



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

# Estudio experimental del comportamiento de secciones huecas rectangulares de acero inoxidable austenítico

Trabajo realizado por:

**Doménica Torres Rubio**

Dirigido por:

**Itsaso Arrayago Luquin**

Máster en:

**Ingeniería Estructural y de la Construcción**

Barcelona, **Junio 2018**

Departamento de Ingeniería Civil i Ambiental (DECA)

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



## RESUMEN

El acero inoxidable es un material metálico que presenta una combinación de buenas propiedades mecánicas y está dotado de una alta resistencia a la corrosión, así como un importante endurecimiento por deformación y una elevada ductilidad.

Este trabajo investiga el comportamiento de secciones huecas rectangulares conformadas en frío de acero inoxidable austenítico. Describe de forma detallada una campaña experimental para cuatro secciones transversales diferentes de acero inoxidable austenítico de grado EN 1.4301. En ella se estudia el comportamiento de la sección transversal de cuatro stub columns sometidos a compresión pura con unas condiciones de contorno equivalentes a un empotramiento y cuatro vigas biapoyadas sometidas a flexión, según el eje fuerte, con dos puntos de aplicación de carga.

Este documento presenta la medición de las dimensiones reales de los especímenes y las imperfecciones locales, así como la instrumentación empleada durante los ensayos para medir magnitudes tales como desplazamientos, deformaciones, cargas, tensiones, acortamientos, etc. para posteriormente poder estudiar los resultados obtenidos de cada ensayo y utilizarlos para el análisis de los resultados experimentales.

Los resultados obtenidos de los ensayos se han comparado con las capacidades resistentes de la sección transversal, sometida a compresión pura y a flexión, predichas en las normas internacionales EN 1993-1-4:2006 y AS/NZS 4673:2001, así como por el Manual de Diseño de Acero Inoxidable y dos métodos alternativos, el Continuous Strength Method (CSM) y el Direct Strength Method (DSM). Se ha observado, en primer lugar, que los límites de clasificación de secciones recogidos en EN 1993-1-4:2006 y en el Manual de Diseño de Acero Inoxidable son adecuados para los perfiles estudiados.

Además, con los resultados obtenidos se observa cómo las normas EN 1993-1-4:2006 y AS/NZS 4673:2001, basadas en criterios de diseño análogos a los del acero al carbono, presentan capacidades resistentes considerablemente conservadoras y del lado de la seguridad. En cambio los métodos de diseño alternativos tienen en cuenta el comportamiento real del acero inoxidable, como su endurecimiento por deformación, y por lo tanto la capacidad resistente obtenida a partir de estas expresiones se aproxima más a los resultados experimentales, proporcionando predicciones más ajustadas y precisas.

## ABSTRACT

Stainless steel is an iron alloy with a minimum of 10,5% of chromium, which presents a good corrosion resistance and high ductility, as well as considerable strain hardening effects that need to be considered in design expressions for an efficient use of the material.

This document investigates the cross-section behaviour of cold-formed austenitic stainless steel elements with rectangular hollow sections. It describes a detailed experimental programme on four different cross-sections of austenitic stainless steel grade EN 1.4301, in which the cross-sectional behaviour was studied through four stub columns test under pure compression and four beam tests under four-point bending moment conditions.

This document presents the measurement of the actual geometry and the initial local imperfections of the specimens. It also summarizes the planning of the experimental programme, presenting different sensors used to measure displacements, loads, strains, end shortenings, etc. All the data was recorded in order to conduct a further assessment of all the results of the experimental programme and compare ultimate loads with the codified design expressions.

The assessment of the codified design expressions was derived by comparing experimental strengths with the calculated resistance predictions for stainless steel cross-sections subjected to different loading conditions in the EN 1993-1-4:2006 and AS/NZS 4673:2001, as well as with the alternative design methods such as the Continuous Strength Method (CSM) and the Direct Strength Method (DSM). The cross-section classification limits provided in the EN 1993-1-4:2006 and in the Design Manual for Structural Stainless Steel were found to be suitable for the studied cross-sections.

The assessment of the different design expressions demonstrated that predictions in international Standards, EN 1993-1-4:2006 and AS/NZS 4673:2001, are noticeably more conservative than those provided by the alternative design methods, since the alternatives methods account for the actual behaviour of stainless steel cross-sections, considering strain hardening effects. Thus, the most accurate and efficient resistance predictions were obtained for the CSM and DSM provisions.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo bajo la supervisión de la tutora Itsaso Arrayago Luquin del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya. Su ayuda, consejos y dedicación han sido uno de los principales pilares para la realización de este proyecto. Quiero agradecerle la paciencia que ha tenido durante estos meses, así como también por todo lo aprendido sobre el acero inoxidable gracias a sus amplios conocimientos en la materia y por estar siempre dispuesta a enseñar y dedicar tiempo para el estudio.

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto nacional de investigación BIA2016-75678-R, AEI/FEDER, UE “Comportamiento estructural de pórticos de acero inoxidable. Seguridad frente a acciones accidentales de sismo y fuego”, financiado por el MINECO (España).

También agradecer a los demás profesores que han formado parte de este proyecto, como son Esther Real, Rolando Chacón y Enrique Mirambell, ya que siempre es un placer trabajar con personas tan preparadas y dispuestas a enseñar.

Al soporte recibido por todos los técnicos del Laboratorio de Tecnología d'Estructures Lluís Agulló, en especial a Carlos, ya que sin su ayuda y dedicación no se hubiese llevado a cabo la campaña experimental.

A mi compañera y amiga Laia Elvira, la cual lleva a mi lado durante toda nuestra formación y con quien he podido compartir esta nueva experiencia.

Al Oriol por su paciencia y por intentar entender todo este proyecto, por sus ánimos y por todas las horas acompañadas.

Finalmente y no menos importante, a mi familia los cuales me han dado su apoyo incondicional durante todo este largo camino y gracias a ellos y a todo lo que me han enseñado a lo largo de la vida estoy donde estoy. Para ellos va dedicado este estudio, ya que sin su constante ayuda no hubiese podido llegar hasta aquí.



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
1.1	Antecedentes .....	13
1.2	Objetivos.....	14
1.2.1	Objetivos generales .....	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	Contenido del documento .....	15
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>17</b>
2.1	Acero inoxidable.....	17
2.2	Acero inoxidable austenítico .....	20
2.3	Coste de ciclo de vida y sostenibilidad .....	22
2.4	Normas aplicables.....	23
2.5	Resistencia de la sección transversal a compresión y flexión .....	24
2.5.1	EN 1993-1-4:2006 [15]: Formulación para resistencia de la sección transversal .....	24
2.5.2	AS/NZS 4673:2001 [12]: Formulación para resistencia de la sección transversal .....	28
2.5.3	Continuous Strength Method (CSM): Formulación para resistencia de la sección transversal.....	29
2.5.4	Direct Strength Method (DSM): Formulación para resistencia de la sección transversal .....	31
2.6	Estudios experimentales previos .....	32
<b>3</b>	<b>PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>35</b>
3.1	Introducción.....	35
3.2	Caracterización y medición de la geometría .....	35
3.2.1	Caracterización de material .....	36
3.2.2	Mediciones de imperfecciones locales.....	36
3.3	Modelos numéricos preliminares .....	41
<b>4</b>	<b>CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>45</b>
4.1	Introducción.....	45
4.2	Stub Columns .....	45
4.2.1	Configuración del ensayo .....	45
4.2.2	Resultados de los ensayos .....	47
4.3	Vigas.....	54
4.3.1	Configuración del ensayo .....	54
4.3.2	Resultados de los ensayos .....	62
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
5.1	Introducción.....	81
5.2	Cálculos previos de las características del material.....	81
5.3	Evaluación de los límites de clasificación de sección.....	82
5.4	Capacidad de la sección transversal sometida a compresión .....	87

5.4.1	Evaluación de la resistencia a compresión en EN 1993-1-4:2006 [15] .....	87
5.4.2	Evaluación de la resistencia a compresión en AS/NZS 4673:20016 [12] .....	89
5.4.3	Evaluación de la resistencia a compresión en Continuous Strength Method (CSM)	90
5.4.4	Evaluación de la resistencia a compresión en Direct Strength Method (DSM)	91
5.5	<b>Comparación de los resultados experimentales y el análisis numérico de secciones sometidas a compresión .....</b>	<b>92</b>
5.6	<b>Capacidad de la sección transversal sometida a flexión .....</b>	<b>93</b>
5.6.1	Evaluación de la resistencia a flexión en EN 1993-1-4:2006 [15] .....	93
5.6.2	Evaluación de la resistencia a flexión en AS/NZS 4673:2006 [12] .....	94
5.6.3	Evaluación de la resistencia a flexión en Continuous Strength Method (CSM)	96
5.6.4	Evaluación de la resistencia a flexión en Direct Strength Method (DSM) .....	97
5.7	<b>Comparación de los resultados experimentales y el análisis numérico de secciones sometidas a flexión .....</b>	<b>99</b>
6	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>101</b>
6.1	<b>Conclusiones específicas .....</b>	<b>101</b>
6.2	<b>Futuras líneas de investigación.....</b>	<b>103</b>
7	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>104</b>



## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de los grupos de acero inoxidable [1].....	17
Tabla 2.2: Composición química del acero inoxidable austenítico 1.4301 según EN 10088 [8] .....	21
Tabla 2.3: Relación anchura-espesor máximas en elementos internos comprimidos [15] .....	25
Tabla 2.4: Elementos internos sometidos a compresión [15].....	27
Tabla 2.5: Ensayos previos de stub columns a compresión .....	33
Tabla 2.6: Ensayos previos de vigas a flexión.....	33
Tabla 3.1: Geometría y nomenclatura de las secciones transversales estudiadas .....	35
Tabla 3.2: Composición química de Mill Certificate .....	36
Tabla 3.3: Propiedades mecánicas según Mill Certificate.....	36
Tabla 3.4: Longitud de los stub columns ensyados .....	37
Tabla 3.5: Medidas reales de las dimensiones iniciales de los especímenes.....	38
Tabla 3.6: Magnitud imperfección $w_0$ para los diferentes stub columns .....	41
Tabla 3.7: Valores de las propiedades del material .....	42
Tabla 3.8: Valores de cálculo preliminares para stub columns FE .....	44
Tabla 3.9: Valores de cálculo preliminares vigas FE .....	44
Tabla 4.1: Características INSTRON 1000 kN .....	45
Tabla 4.2: Características galga extensométricas .....	46
Tabla 4.3: Resumen de los resultados de los ensayos en stub columns a compresión...	53
Tabla 4.4: Características sensor ultrasonido .....	59
Tabla 4.5: Velocidad de ensayos a flexión en vigas.....	62
Tabla 4.6: Valores numéricos finales ensayo viga S1 .....	65
Tabla 4.7: Valores numéricos finales ensayo viga S2 .....	68
Tabla 4.8: Valores numéricos finales ensayo viga S3 .....	72
Tabla 4.9: Valores numéricos finales ensayo viga S4 .....	75
Tabla 4.10: Propiedades mecánicas de la secciones de las vigas .....	78
Tabla 4.11: Resumen de los resultados de los ensayos en vigas a flexión .....	78
Tabla 5.1: Propiedades ponderadas del material .....	82
Tabla 5.2: Relación ancho-espesor máxima de elementos internos comprimidos .....	83
Tabla 5.3: Clasificación de las secciones transversales de los stub columns sometidas a compresión según EN 1993-1-4:2006 [15] .....	83
Tabla 5.4: Clasificación de las secciones transversales de los stub columns sometidas a compresión según Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2] .....	83
Tabla 5.5: Clasificación de los elementos que forman el ancho de las vigas sometidos a compresión .....	85
Tabla 5.6: Clasificación de los elementos que forman la altura de las vigas sometidas a flexión.....	85
Tabla 5.7: Comparación de clasificación de secciones según campaña experimental y normas .....	87
Tabla 5.8: Resultado de la capacidad resistente a compresión según EN 1993-1-4:2006 [15] .....	88
Tabla 5.9: Resultado de la capacidad resistente a compresión según AS/NZS 4673:2001 [12] .....	89

Tabla 5.10: Resultado de la capacidad resistente a compresión según CSM.....	91
Tabla 5.11: Resultado de la capacidad resistente a compresión según DSM.....	92
Tabla 5.12: Comparación de los ensayos experimentales a compresión con la capacidad resistente según las normas y métodos de cálculo alternativos .....	92
Tabla 5.13: Resultado de la capacidad resistente a flexión según EN 1993-1-4:2006 [15] .....	94
Tabla 5.14: Resultado de la capacidad resistente a flexión según NS/NZE 4673:2001 [12] .....	95
Tabla 5.15: Resultado de la capacidad resistente a flexión según CSM .....	97
Tabla 5.16: Resultado de la capacidad resistente a flexión según DSM .....	98
Tabla 5.17: Resultado de la capacidad resistente a flexión considerando el comportamiento inelástico según DSM.....	99
Tabla 5.18: Comparación de los ensayos experimentales a flexión con la capacidad resistente según las normas y métodos de cálculo alternativos .....	99

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Curvas tensión-deformación completas para diferentes tipos de acero inoxidable y el acero al carbono [2] .....	19
Figura 2.2: Fluctuación precio de Níquel [6] .....	20
Figura 2.3: Grande Arche de la Défense (Figura por Carole Barriquand-Treuille) .....	21
Figura 2.4: Estación de Sint Pieter en Gante – Bélgica.....	22
Figura 2.5: The Jin Mao, Shanghai, fachada con acero inoxidable de grado 1.4401 (316) [9] .....	22
Figura 3.1: Definición de los símbolos de la sección transversal.....	37
Figura 3.2: Mediciones de las imperfecciones locales en stub columns .....	38
Figura 3.3: Mediciones de las imperfecciones locales S1-SC 120x80x6.....	39
Figura 3.4: Mediciones de las imperfecciones locales S2-SC 100x80x4.....	40
Figura 3.5: Mediciones de las imperfecciones locales S3-SC 120x40x4.....	40
Figura 3.6: Mediciones de las imperfecciones locales S4-SC 200x100x3.....	41
Figura 3.7: Comportamiento tensión-deformación de las zonas planas y de las esquinas en elementos conformados en frío de acero inoxidable austenítico. ....	43
Figura 3.8: Curvas numéricas de carga-acortamiento para stub columns .....	43
Figura 3.9: Curvas numéricas de carga-flecha para vigas .....	44
Figura 4.1: Preparación ensayos a compresión stub columns .....	47
Figura 4.2: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S1-SC 120x80x6 .....	48
Figura 4.3: Curvas tensión - deformación para el espécimen S1-SC 120x80x6 .....	48
Figura 4.4: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S2-SC 100x80x4 .....	49
Figura 4.5: Curvas tensión - deformación para el espécimen S2-SC 100x80x4 .....	49
Figura 4.6: S2-SC después del ensayo experimental.....	50
Figura 4.7: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S3-SC 120x40x4 .....	50
Figura 4.8: Curvas tensión – deformación para el espécimen S3-SC 120x40x4 .....	51
Figura 4.9: S3-SC después del ensayo experimental.....	51
Figura 4.10: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S4-SC 200x100x3 .....	52
Figura 4.11: Curvas tensión - deformación para el espécimen S4-SC 200x100x3 .....	52
Figura 4.12: S4-SC después del ensayo experimental.....	53
Figura 4.13: Colocación bloques de madera .....	54
Figura 4.14: Esquema acotado con la posición de los puntos de aplicación de la carga .....	55
Figura 4.15: Colocación viga cargadero pre-ensayos.....	56
Figura 4.16: Sección longitudinal de estructura auxiliar.....	56
Figura 4.17: Sección transversal de estructura auxiliar.....	57
Figura 4.18: Esquema elementos que forman el apoyo.....	58
Figura 4.19: Apoyo in situ en el laboratorio.....	58
Figura 4.20: Conexión del sensor de ultrasonido e instrumentación en el laboratorio ..	60
Figura 4.21: Portal Camins Smartlab .....	60
Figura 4.22: Esquema de colocación de sensores.....	61
Figura 4.23: Ensayo preparado para viga de sección S3 .....	61
Figura 4.24: Fallo de la viga cargadero durante el ensayo de la viga S1 .....	63
Figura 4.25: Curva carga – rotación de la viga S1 .....	63
Figura 4.26: Curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga S1 .....	64

Figura 4.27: Curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S1 .....	64
Figura 4.28: Preparación y realización del ensayo de la viga S1 .....	65
Figura 4.29: Curva momento flector – curvatura última viga S1 .....	66
Figura 4.30: Curva carga – rotación de la viga S2 .....	66
Figura 4.31: Curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga S2 .....	67
Figura 4.32: Curva carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S2 .....	67
Figura 4.33: Preparación y realización ensayo viga S2.....	68
Figura 4.34: Curva momento flector – curvatura última de la viga S2 .....	69
Figura 4.35: Deformación viga S3 fuera del plano .....	69
Figura 4.36: Curva carga – rotación en la viga S3 .....	70
Figura 4.37: Curvas carga –desplazamiento en el centro de la viga S3 .....	70
Figura 4.38: Curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S3 .....	71
Figura 4.39: Curvas carga – deformación viga S3 .....	71
Figura 4.40: Preparación y realización ensayo viga S3.....	72
Figura 4.41: Curva momento flector – curvatura última de la viga S3 .....	73
Figura 4.42: Primer ensayo viga S4 – movimiento lateral de los estabilizadores .....	73
Figura 4.43: Curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga S4 .....	74
Figura 4.44: Curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S4 .....	74
Figura 4.45: Preparación y realización ensayo viga S4.....	75
Figura 4.46: Gráfica momento flector – curvatura última viga S4.....	76
Figura 4.47: Curva para obtener la capacidad de rotación R.....	77
Figura 4.48: Definición de la simbología para determinar la curvatura en las vigas a flexión.....	77
Figura 4.49: Curvas normalizadas momento flector - curvatura .....	79
Figura 4.50: Resultado final de las cuatro vigas ensayadas a flexión .....	80
Figura 5.1: Región plana y esquina de la sección transversal .....	81
Figura 5.2: Clasificación sección transversal stub columns sometidos a compresión ...	84
Figura 5.3: Límite Clase 3 para los elementos en compresión en las vigas simplemente apoyadas .....	86
Figura 5.4: Límite Clase 2 para elementos en compresión en las vigas simplemente apoyadas .....	86

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Antecedentes

El acero inoxidable es un tipo de acero resistente a la corrosión y al calor que proviene de una aleación de hierro con un mínimo de 10,5 % de cromo. Esta aleación fue desarrollada con la cooperación de científicos y metalúrgicos y empezó a ser utilizada a principios del año 1910 con aplicaciones, principalmente, en equipamientos para cocinas.

La propiedad de resistencia a la corrosión del acero inoxidable se atribuye al porcentaje de contenido de cromo en su microestructura, formando una capa de óxido rica en cromo sobre su superficie cuando se encuentra expuesto al aire o en cualquier ambiente corrosivo. Se debe considerar que el contenido químico del acero inoxidable puede estar dotado adicionalmente de níquel, molibdeno, nitrógeno, titanio y cobre, que dotaran de un amplio rango de grados de acero inoxidable donde cada uno de ellos es adecuado para un uso específico. Para la selección del grado de acero inoxidable adecuada para una aplicación particular hay que tener en cuenta el ambiente donde se encontrará expuesto, su fabricación, si requiere un acabado superficial, la predicción de vida útil y su futuro mantenimiento.

El acero inoxidable se divide en cinco familias diferentes, que se clasifican principalmente por su estructura atómica y de las cuales cada una tiene propiedades únicas y diferentes niveles de resistencia a la corrosión. Sus nomenclaturas son austenítico, ferrítico, dúplex, martensítico y endurecidos por precipitación. Las familias de acero inoxidable austenítico y dúplex son las más comunes para aplicaciones estructurales. Estas dos familias presentan una mayor resistencia a la corrosión y elevada ductilidad.

Uno de los componentes principales del acero inoxidable es el níquel y es el motivo de su alto coste ya que es un material con continuas fluctuaciones económicas.

Otra ventaja que cabe mencionar sobre el acero inoxidable es su bajo impacto ambiental, ya que es un material formado por chatarra, la cual es derivada desde vertederos y reciclada hacia nuevos materiales. El contenido común de material reciclado para cualquier tipo de acero inoxidable ronda el 60%. De este modo el acero inoxidable es 100% reciclable y puede ser reciclado indefinidamente para la elaboración de nuevos aceros inoxidables sin reducir su calidad.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal sobre el cual está enfocado este documento es para entender el comportamiento general de secciones huecas rectangulares de acero inoxidable austenítico sometidas a flexión y compresión pura a partir de una campaña experimental.

Toda la campaña experimental se enmarca dentro de un estudio relacionado con el comportamiento estructural pórticos, pilares, vigas y nivel de material de elementos de acero inoxidable austenítico.

Este documento representa una investigación preliminar para conocer el comportamiento a compresión y flexión de las secciones, que servirá para analizar los resultados de la campaña experimental del comportamiento de los pórticos de acero inoxidable austenítico.

Los objetivos están subdivididos en generales y específicos.

### 1.2.1 Objetivos generales

Este estudio está centrado en el desarrollo de un programa experimental para vigas sometidas a flexión y stub columns sometidos a compresión pura de acero inoxidable austenítico, de manera que se pueda estudiar el comportamiento y la capacidad resistente de la sección transversal.

La campaña experimental se ha realizado tanto para secciones robustas como para esbeltas y se llevará a cabo una evaluación de los resultados obtenidos con las normas o métodos alternativos de diseño enfocados en el acero inoxidable.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- Realizar todos los trabajos previos a la campaña experimental, como las mediciones iniciales y las mediciones de las imperfecciones locales de los especímenes.
- Preparar toda la instrumentación para la elaboración de la campaña experimental.
- Realizar la conexión y la configuración de los sensores y elementos que proporcionaran los resultados de los ensayos.

- Llevar a cabo la campaña experimental para las secciones huecas rectangulares de acero inoxidable austenítico, tanto para stub columns sometidos a compresión pura como vigas sometidas a flexión pura.
- Análisis de los resultados obtenidos con los códigos de diseño actuales para acero inoxidable.

### 1.3 Contenido del documento

El contenido y metodología de trabajo que se ha desarrollado para conseguir los objetivos mencionados anteriormente es descrita aquí.

1. Estado del arte. Se realizará una investigación sobre el acero inoxidable, su comportamiento estructural, normas internacionales y métodos alternativos para el diseño de secciones de acero inoxidable y campañas experimentales previas sobre el mismo tema.
2. Preparación de la campaña experimental. Todos los pasos previos que se necesitan realizar antes de la elaboración de los ensayos.
  - 2.1. Medidas de las dimensiones iniciales de los especímenes.
  - 2.2. Medidas de las imperfecciones locales de los especímenes, para encontrar la magnitud de imperfección máxima.
  - 2.3. Modelos numéricos preliminares, realizados por otros integrantes del estudio, que servirán para predecir la capacidad última, acortamiento y flecha máxima para stub columns y vigas respectivamente.
3. Campaña experimental. Se explicará la campaña realizada en el Laboratorio de Tecnologia d'Estructures Lluís Agulló en la Universidad Politècnica de Catalunya para cuatro secciones huecas rectangulares de acero inoxidable austenítico.
  - 3.1. Los cuatro ensayos realizados para evaluar el comportamiento a compresión pura de stub columns.
  - 3.2. Los cuatro ensayos realizados para evaluar el comportamiento a flexión pura de vigas ensayas en el eje fuerte.
4. Análisis de resultados. Se evalúan las diferentes normas y métodos alternativos de diseño basado en el acero inoxidable.
  - 4.1. Cálculos previos para conocer las características del material.
  - 4.2. Evaluación de los límites de clasificación de las secciones.

- 4.3. Capacidad de la sección transversal sometida a compresión.
- 4.4. Capacidad de la sección transversal sometida a flexión.
- 4.5. Comparación de los resultados obtenidos en la campaña experimental con el análisis numérico tanto de secciones transversales sometidas a compresión pura como a flexión.



## 2 ESTADO DEL ARTE

Este estudio de centrará en el acero inoxidable austenítico, así pues en este apartado se explicará brevemente qué es el acero inoxidable, las propiedades de material, tipos de acero inoxidable, su comportamiento mecánico y físico, los códigos y métodos alternativos para el diseño estructural del acero inoxidable y se realizará una búsqueda de todos los ensayos realizados anteriormente sobre este tipo de acero y de secciones.

### 2.1 Acero inoxidable

El acero inoxidable es un material que tiene un contenido mínimo de 10,5% de cromo y no más del 1,2% de carbono, el cual posee una excelente combinación de resistencia a la corrosión y buenas propiedades mecánicas para aplicaciones estructurales.

El acero inoxidable es un material descubierto a principios del siglo XX, cuando al acero al carbono se le añadió una cantidad de cromo y se obtuvo un metal con un acabado muy brillante y una alta resistencia a la corrosión.

Actualmente se puede clasificar en cinco grupos los diferentes tipos de aceros inoxidables donde básicamente su diferencia está en el contenido de cromo y níquel como se puede ver en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Clasificación de los grupos de acero inoxidable [1]

		Inoxidable Austenítico	Inoxidable Ferrítico	Inoxidable Dúplex	Inoxidable Martensítico	Inoxidable endurecidos por precipitación
Contenido	Cromo	17 - 18 %	10,5 – 18 %	20 – 26 %	11,50 – 18 %	12,25 – 18 %
	Níquel	8 – 11 %	0 %	1 – 8 %	-	3 – 8,5 %
	Otros	-	-	Molibdeno + nitrógeno	Carbono 0,08 – 1,20 %	Molibdeno

Las características principales de los cinco tipos de acero inoxidable son las siguientes [2]:

- **Acero inoxidable austenítico:** Su estructura atómica es cristalina y se encuentra centrada en las caras, debido a esto poseen una elevada ductilidad, tienen fácil conformación y son fácilmente soldables. En el punto 2.2 se hablará más ampliamente sobre este tipo de acero inoxidable.

- **Acero inoxidable ferrítico:** Su estructura atómica se ubica centrada en el cubo, de igual manera que el acero al carbono. Es más barato que el acero inoxidable austenítico debido a que su contenido en níquel es prácticamente nulo. Son menos dúctiles y menos soldables que los aceros austeníticos. Su resistencia puede ser aumentada mediante el trabajado en frío, pero no con tratamiento térmico. Su resistencia a la corrosión puede verse mejorada si a su contenido químico se le añade molibdeno. Normalmente en acero inoxidable ferrítico se utilizan espesores igual o menores a 4 mm.
- **Acero inoxidable dúplex:** Posee una microestructura mixta entre el acero austenítico y el ferrítico. Su resistencia duplica la resistencia de un acero austenítico en la condición de recocido, esto permite crear estructuras de menor peso propio, ya que permite la utilización de secciones transversales más pequeñas. Su resistencia puede ser aumentada mediante el trabajado en frío, pero no con tratamiento térmico.
- **Acero inoxidable martensítico:** Su estructura atómica es similar al acero ferrítico, centrada en el cuerpo. Su principal diferencia respecto a los otros tipos de acero inoxidable es que puede mejorar su resistencia mediante tratamiento térmico debido a su alto contenido de carbono. Es el tipo de acero inoxidable menos dúctil y sensible al efecto entalla.
- **Acero inoxidable endurecido por precipitación:** Es un acero inoxidable en que su microestructura depende del grado, ya que su resistencia puede aumentar mucho mediante tratamiento térmico y se clasifica en tres grupos: martensítico, semi-austenítico y austenítico.

La propiedad principal del acero inoxidable es su alta resistencia a la corrosión, pero hay que tener en cuenta que su resistencia puede variar según su contenido químico, con lo cual, dependerá del grado de acero inoxidable que se escoja tener una resistencia u otra.

Para una buena elección del acero inoxidable como material estructural hay que tener en cuenta los siguientes factores:

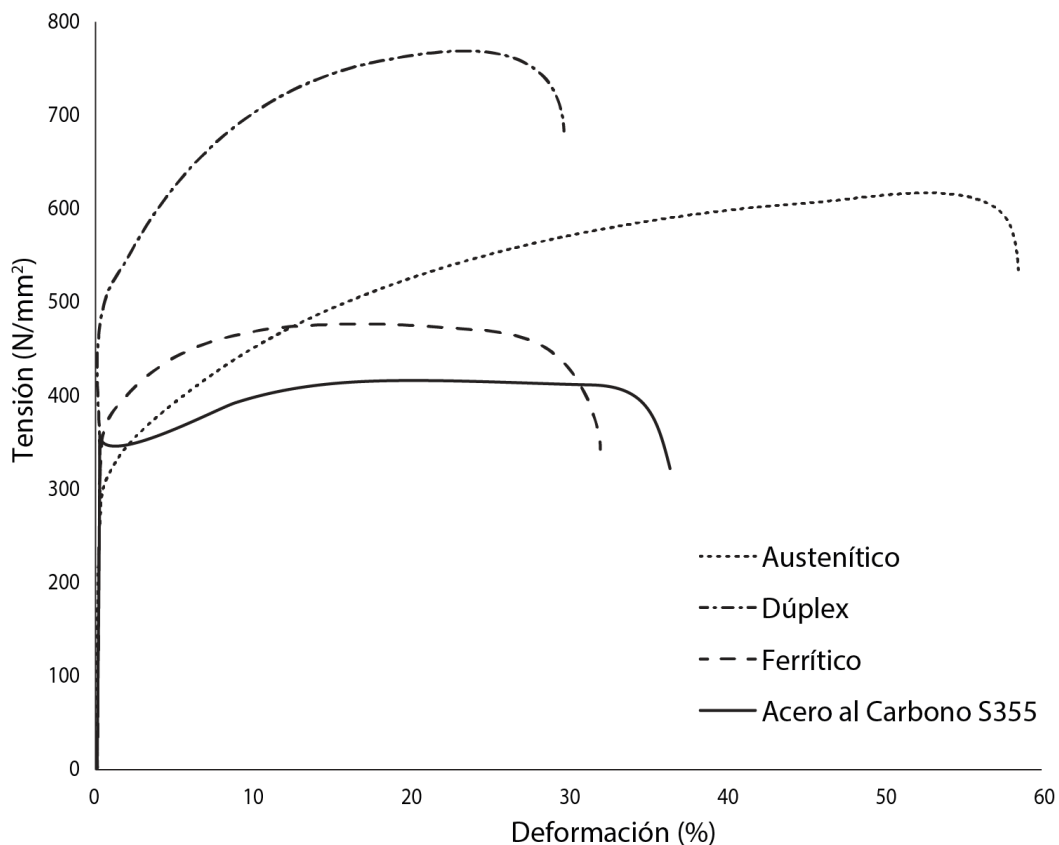
- Ambiente donde estará expuesto
- Exposición a otras sustancias corrosivas
- Vida útil de la estructura
- Uso o aplicación
- Contacto con otros metales / hendiduras no selladas
- Acabado superficial

La responsabilidad única de la elección del tipo de acero inoxidable y su grado es del proyectista o de la propiedad.

Por otra parte, el comportamiento tenso-deformacional del acero inoxidable es diferente al del acero al carbono, que tiene una rama lineal elástica hasta su límite elástico y después una zona plana antes del endurecimiento por deformación. En cambio, el acero

inoxidable cuenta con una curva tensión-deformación con un comportamiento no lineal, es decir, redondeada, como se puede ver en la Figura 2.1, y no tiene su límite elástico claramente definido.

Remitiendo a lo explicado con anterioridad, se vio en la necesidad de desarrollar diferentes modelos de analíticos para caracterizar el material teniendo en cuenta el comportamiento de tensión-deformación del acero inoxidable y para mejorar la seguridad del diseño de la estructura. El modelo de material más utilizado ha sido el de Ramberg y Osgood [3] y modificado por Hill [4]. A partir de este modelo han habido diferentes estudios y se han propuesto otros, como el de Mirambell y Real [5] basado en la expresión de Ramberg y Osgood [3] pero en el cual se introduce un segundo tramo a partir del límite elástico, para poder representar adecuadamente el comportamiento del material hasta niveles elevados de deformación. Cabe recalcar que los distintos modelos se basan en varios parámetros de material que se han calibrado a partir de ensayos experimentales.



**Figura 2.1: Curvas tensión-deformación completas para diferentes tipos de acero inoxidable y el acero al carbono [2]**

Analizando la Figura 2.1, se observa que el acero inoxidable ferrítico proporciona más resistencia que el acero al carbono, asimismo el acero inoxidable austenítico es el que posee mayor ductilidad y endurecimiento por deformación. Al contrario que el acero

inoxidable dúplex el cual tiene prácticamente el doble de resistencia que el acero inoxidable austenítico pero menor ductilidad.

## 2.2 Acero inoxidable austenítico

Como se ha explicado con anterioridad este proyecto está centrado en el acero inoxidable austenítico, que forma uno de los cinco grupos en los cuales se clasifica el acero inoxidable.

El acero inoxidable austenítico está compuesto básicamente de cromo y níquel, por lo que no es magnético, aunque podría llegar a serlo cuando se realiza conformados en frío.

Su contenido en níquel produce que su precio sea más elevado en comparación con los demás aceros inoxidables, ya que este material es un elemento con continuas fluctuaciones económicas como se puede ver en la Figura 2.2.

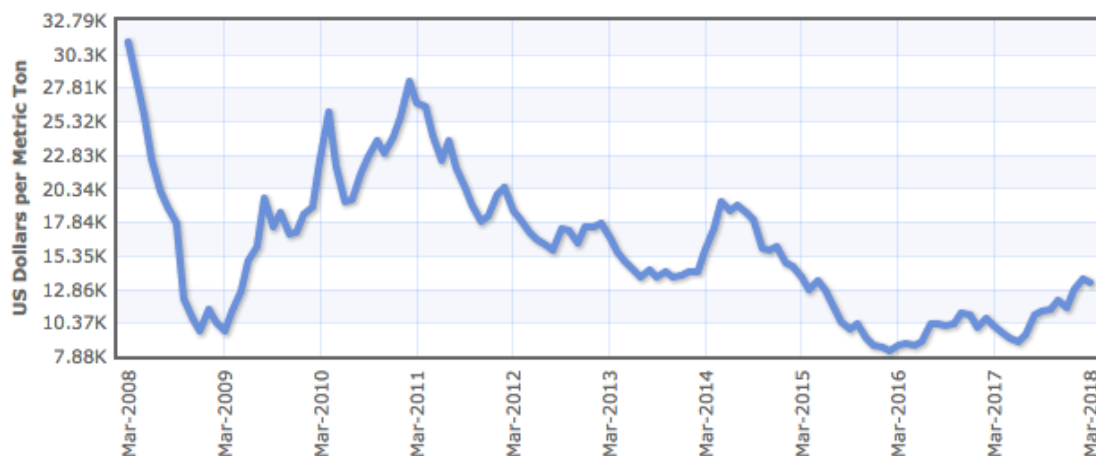


Figura 2.2: Fluctuación precio de Níquel [6]

Así pues tiene un coste superior respecto al acero al carbono y al ferrítico, pero tiene ventajas en relación a estos dos, como por ejemplo su alta ductilidad, su facilidad de conformación, su fácil soldadura y su excelentes propiedades mecánicas en rangos de temperaturas altas. Todas estas características hacen que el acero inoxidable austenítico sea utilizado generalmente para aplicaciones estructurales en las que se requiere una buena resistencia

El acero inoxidable por lo general está sometido a un proceso de tratamiento térmico en el que se calienta y se mantiene a la temperatura deseada durante un tiempo y luego se pasa a temprar rápidamente. Como se ha mencionado anteriormente, el trabajado en frío para el acero austenítico produce un aumento de su resistencia, pero esta mejora provoca una disminución de la ductilidad.

Todas estas propiedades físicas y mecánicas hacen que el acero inoxidable austenítico sea el más utilizado en aplicaciones de edificación y construcción.

En la campaña experimental realizada el grado de acero inoxidable austenítico utilizado es el EN 1.4301 – AISI 304, que según EN-10088 [8], su rango de contenido químico estándar está entre los valores que se presentan en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2: Composición química del acero inoxidable austenítico 1.4301 según EN 10088 [8]**

	<b>Grado</b>	<b>Carbono</b>	<b>Cromo</b>	<b>Níquel</b>
<b>Austenítico</b>	<b>1.4301 - 304</b>	0,07 %	17,5 – 19,5 %	8,0 – 10,5 %

Los aceros austeníticos más utilizados en aplicaciones estructurales son los tipos 1.4301 y 1.4401, su principal diferencia es que el acero inoxidable austenítico 1.4401 contiene molibdeno, mientras que el 1.4301 no. El acero 1.4401 es resistente a la sales de cloruro y a la corrosión que produce la polución [9].

En acero inoxidable austenítico 1.4301 (304) y 1.4307 (304L) comúnmente ha sido utilizado en edificios históricos y el 1.4401 (316) y 1.4404 (316L) en exteriores de edificios y como protección encima de otros. El término L en la designación del grado de acero inoxidable indica que su contenido de carbono es bajo.

Sus aplicaciones estructurales se pueden encontrar por todo el mundo, pero en la Figura 2.3, Figura 2.4 y Figura 2.5 se presentan algunos ejemplos.



**Figura 2.3: Grande Arche de la Défense (Figura por Carole Barriquand-Treuille)**



**Figura 2.4:** Estación de Sint Pieter en Gante – Bélgica



**Figura 2.5:** The Jin Mao, Shanghai, fachada con acero inoxidable de grado 1.4401 (316) [9]

### 2.3 Coste de ciclo de vida y sostenibilidad

En el momento de la elección de un material para la construcción se debe tener en cuenta el coste total del ciclo de vida y no solamente el coste inicial de adquisición. Así pues hay que contemplar todos los factores que influyen en el coste total del ciclo de vida, que son los siguientes:

- Coste de adquisición, fabricación e instalación
- Coste de mantenimiento



- Coste de remplazo
- Coste residual

El acero inoxidable tiene un coste notablemente más elevado que el acero al carbono, no obstante la protección a la corrosión que proporciona el acero inoxidable sin necesidad de ningún recubrimiento reduce el coste de instalación.

Su alta durabilidad a causa de su resistencia a la corrosión permite que el mantenimiento e inspección a lo largo de la vida útil del material sea muy reducido respecto a otros materiales, por lo que el coste de mantenimiento a largo plazo se disminuye.

Por las mismas características comentadas anteriormente del acero inoxidable, su remplazo suele ser prácticamente nulo, ya que no se realiza un cambio de estructura o de material.

Finalmente el acero inoxidable se considera un producto verde, es decir, es 100% reciclable y puede ser reciclado indefinidamente, siempre y cuando no se haya aplicado un acabado tóxico. Esto es debido a su composición química ya que ninguno de los materiales que lo conforman producen residuos tóxicos.

En su elaboración el acero inoxidable utiliza un 60-70% [2;9] de producto que proviene de material ya reciclado y por lo tanto el valor residual (entendiendo como valor residual el valor que tiene el material al final de su vida útil), es muy alto ya que está formado de chatarra.

## 2.4 Normas aplicables

En este apartado se explicará los criterios de diseño internacionales para la determinación de la resistencia a compresión y flexión de elementos de acero inoxidable, así como los métodos avanzados propuestos durante los últimos años y las diferencias significativas entre ellos.

La primera normativa para el diseño de estructuras de acero inoxidable fue la “Specification for the Design of Light Gauge Cold-Formed Stainless Steel Structural Member” [10], publicada en 1968 por el “American Iron and Steel Institute (AISI)”, tras varias revisiones realizadas por “American Society of Civil Engineers (ASCE)” y por AISI, la última versión del manual de diseño americano fue “Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members ESI/ASCE 8-02” [11] publicada en 2002.

Basada en la normativa estadounidense, pero con criterios de diseño alternativos se presentó en el año 2001 la normativa de Australia y Nueva Zelanda titulada “AS/NZS 4673: 2001 Cold-Formed Stainless Steel Structures” [12], realizado por “Joint Technical Committee”.

El primer manual de diseño europeo fue el “Design Manual for Structural Stainless Steel” [13] publicado en 1994 por EuroInox. Actualmente se ha publicado la cuarta edición (2017) [2] de este manual y se puede encontrar traducida a diferentes idiomas.

Por otra parte en Europa también encontramos, con su primera publicación en 1996, “ENV1993:1-4 Design of Steel Structures-Supplementary rules for stainless steels”, realizado por European Standards Committee CEN. La parte del Eurocódigo 3 que trata sobre el comportamiento estructural del acero inoxidable es EN 1993-1-4 [15]. Esta norma se basa en la propia para el acero al carbono, EN 1993-1-1 [14], y recoge las reglas suplementarias que deben adoptarse para el diseño de estructuras de acero inoxidable.

Actualmente se trabaja con el Eurocódigo revisado y aprobado por el CEN en el año 2006, EN 1993-1-4:2006 [15] y con una revisión en el año 2015.

## **2.5 Resistencia de la sección transversal a compresión y flexión**

En este apartado se explicará los diferentes métodos que existen actualmente para poder hacer el cálculo de la resistencia última de una sección transversal frente a compresión y flexión.

Como se ha comentado con anterioridad, el comportamiento del acero inoxidable es diferente al del acero al carbono. No obstante en las normas aplicables se asume un comportamiento análogo al del acero al carbono, pero realizando modificaciones para tener en cuenta el comportamiento del acero inoxidable.

A continuación se expondrán los métodos de cálculo de la norma europea EN 1993-1-4:2006 [15] y australiana AS/NZS 4673:2001 [12] y también se presentaran dos métodos alternativos más avanzados para determinar la resistencia última de la sección transversal que actualmente siguen evolucionando y que tienen en cuenta el comportamiento específico del acero inoxidable, como puede ser el importante endurecimiento por deformación, el Continuous Strength Method y el Direct Strength Method.

### **2.5.1 EN 1993-1-4:2006 [15]: Formulación para resistencia de la sección transversal**

La normativa europea EN 1993-1-4:2006 [15], requiere una clasificación previa de las secciones para así poder evaluar y utilizar de forma correcta la formulación que contiene esta normativa. El tipo de clases de sección son análogas a las del acero al carbono y se definen a continuación:

- Clase 1: Secciones transversales en las que se puede formar una rótula plástica y por lo tanto se realiza un análisis plástico de la sección.



- Clase 2: Secciones transversales en las que se puede alcanzar el momento plástico pero su capacidad de rotación es más limitada.
- Clase 3: Secciones transversales en las que la fibra más comprimida puede llegar al límite elástico, pero es sensible de sufrir abolladura por lo que puede impedir llegar al momento plástico.
- Clase 4: Secciones transversales en las que la abolladura se produce antes de alcanzar la tensión de límite elástico en las partes más susceptibles de la sección transversal.

La clasificación de una sección transversal se realiza en función del elemento de la sección con clase de sección más alta o menos favorable. Se debe tener en cuenta el esfuerzo al cual está sometido dicho elemento.

La clasificación de secciones según EN1993-1-4:2006 [15] se muestran en la Tabla 2.3, donde se exponen los límites para Clase 1, 2 y 3 correspondiente a elementos internos comprimidos para diferentes estados de compresión y flexión. Se clasificarán como Clase 4 las secciones que no cumplan los criterios de Clase 3.

**Tabla 2.3: Relación anchura-espesor máximas en elementos internos comprimidos [15]**

Elementos internos comprimidos					
			<p>Distribución de tensiones (compresión +)</p> <p>Eje de flexión</p> <p>Elastica</p> <p>Plástica</p>		
Clase	Elemento sometido a flexión	Elemento sometido a compresión	Elemento sometido a flexión y compresión		
1	$c/t \leq 72,0\varepsilon$	$c/t \leq 33,0\varepsilon$	cuando $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq 396,0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ cuando $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq 36,0\varepsilon/\alpha$		
2	$c/t \leq 76,0\varepsilon$	$c/t \leq 35,0\varepsilon$	cuando $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq 420,0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ cuando $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq 38,0\varepsilon/\alpha$		
3	$c/t \leq 90,0\varepsilon$	$c/t \leq 37,0\varepsilon$	$c/t \leq 18,5\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ para $k_\sigma$ ver 5.4.1		
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$		Grado	1.4301	1.4401	1.4462
		$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
		$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
Notas: Para secciones huecas, $c$ puede tomarse como $(h - 3t)$ o $(b - 3t)$ $E = 200 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> $\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)$ para secciones simétricas alrededor del eje fuerte					

Cuando nos encontramos ante una sección Clase 4, su sección transversal tiene que ser analizada según los esfuerzos a los cuales se va a ver sometida. Estos esfuerzos pueden provocar una reducción de la sección transversal que se calculará a partir de la expresión (2.1) para elementos internos conformados en frío o soldados y en la expresión (2.2) se obtiene la esbeltez del elemento  $\lambda_p$ , mediante el método del ancho eficaz.

Con el cálculo de las expresiones comentadas se obtiene un coeficiente de reducción que se aplicará al área bruta de la sección transversal para obtener el área eficaz.

En el caso de secciones sometidas a flexión será necesario el cálculo de la inercia de la sección eficaz  $I_{eff}$  y el módulo resistente elástico de la sección eficaz  $W_{eff}$ .

$$\rho = \frac{0,772}{\lambda_p} - \frac{0,079}{\lambda_p^2} \text{ siendo } \leq 1,0 \quad (2.1)$$

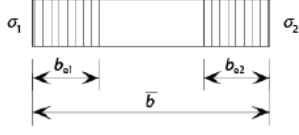
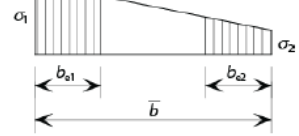
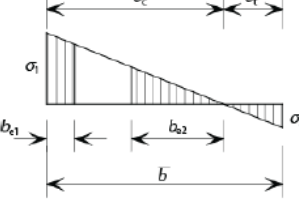
$$\lambda_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (2.2)$$

Donde:

- t es el espesor del elemento
- $k_\sigma$  es el coeficiente de abolladura según la Tabla 2.4
- $\bar{b}$  es el ancho eficaz definido como:
  - $\bar{b} = d$  para almas, excepto para secciones huecas rectangulares (SHR)
  - $\bar{b} = \text{ancho del elemento plano para almas de (SHR) } h-2t$
  - $\bar{b} = b$  para elementos interiores de alas, excepto para SHR
  - $\bar{b} = \text{ancho del elemento plano para alas de SHR } b - 2t$
- $\epsilon$  es el coeficiente según la Tabla 2.3
- h es la altura de la sección transversal
- b es el ancho de la sección transversal

En el Manual de Diseño para Estructuras de Acero Inoxidable [2] se toman valores menos conservadores para el cálculo de  $\bar{b}$  para las almas y alas de secciones huecas rectangulares (SHR) siendo  $h - 3t$  y  $b - 3t$  respectivamente.

**Tabla 2.4: Elementos internos sometidos a compresión [15]**

Distribución de tensiones (compresión positiva)				Ancho eficaz $b_{eff}$		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Coeficiente de abolladura $k_{\sigma}$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

En el presente estudio solamente se realizarán ensayos con secciones huecas rectangulares, por lo cual solamente nos encontraremos con elementos internos sometidos a compresión y a flexión. Dado este motivo no se muestran las tablas y expresiones de la norma correspondientes a elementos externos.

En las expresiones (2.3) y (2.4) se muestra la manera de obtener la capacidad de resistencia de cálculo de una sección transversal sometida a un esfuerzo de compresión y la resistencia de cálculo a flexión de una sección transversal respectivamente.

$$N_{c,Rd} = \frac{\beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.3)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{\beta_w \cdot W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.4)$$

Cuando se trate de secciones transversales clasificadas como Clases 1, 2 y 3 se tomará el valor de  $\beta_A = 1$ , sin embargo, si la sección es Clase 4 se optará por  $\beta_A = A_{eff}/A$ , donde  $A$  es el área bruta de la sección transversal y  $A_{eff}$  es el área eficaz. El valor de  $f_y$ , es el límite elástico del acero inoxidable.

En el cálculo a flexión se considera  $\beta_w = 1$ , cuando nos encontremos en Clase 1 y 2, para Clase 3,  $\beta_w = W_{el}/W_{pl}$  y finalmente para Clase 4, se tendrá en cuenta el área efectiva, por lo que,  $\beta_w = W_{eff}/W_{pl}$ , donde  $W_{pl}$  es el módulo plástico,  $W_{el}$  es el módulo elástico y

$W_{eff}$  es el módulo elástico efectivo.

La resistencia de cálculo se ve afectada por un coeficiente parcial  $\gamma_{M0}$  el cual puede tomar diferentes valores según la aplicación para la cual se esté calculando. En la norma europea para acero inoxidable EN 1993-1-4:2006 [15] para secciones transversales se utilizará el valor de 1,10 pero siendo diferente en otras partes de aplicación de EN 1993 según su aplicación estructural como para puentes (EN 1993-2) o torres, mástiles y chimeneas (EN 1993-3) y por lo tanto se remplazará este valor por los coeficientes parciales para el acero al carbono.

### 2.5.2 AS/NZS 4673:2001 [12]: Formulación para resistencia de la sección transversal

Del mismo modo que la normativa europea, la normativa australiana AS/NZS 4673:2001 [12] también se basa en los criterios análogos a la clasificación de secciones para el cálculo de las resistencias transversales. No obstante, tanto los límites como las expresiones para calcular el área eficaz difieren de las definidas en EN 1993-1-4:2006 [15], en esta normativa se ha marcado un límite de esbeltez, que será el cual nos indique si hay que realizar reducción o no. En la expresión (2.5) se observa el límite de esbeltez y en las expresiones (2.6) y (2.7) el cálculo de los parámetros para encontrar el área eficaz, el coeficiente de reducción y la determinación de la esbeltez de cada elemento.

$$\begin{aligned} \lambda &\leq 0,673 b_e = b \\ \lambda &> 0,673 b_e = \rho b \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\rho = \frac{\left(1 - \frac{0,22}{\lambda}\right)}{\lambda} \leq 1,0 \quad (2.6)$$

$$\lambda = \left(\frac{1,052}{\sqrt{K}}\right) \left(\frac{b}{t}\right) \left(\sqrt{\frac{f^*}{E_0}}\right) \quad (2.7)$$

Donde:

- $b$  es el ancho del elemento descontando la curvatura  
 $K$  es el coeficiente de abolladura  
 $t$  es el espesor del elemento comprimido  
 $f^*$  es la tensión de diseño de compresión del elemento calculado en la base del ancho eficaz.  
 $E_0$  el módulo de elasticidad de Young

Para determinar el valor de  $f^*$  al tratar el comportamiento de la sección transversal se adoptará el valor del límite elástico de la sección  $f_y$ .

Las vigas robustas, especialmente de acero inoxidable, tienen un significativo comportamiento inelástico y el momento flector último normalmente alcanza la capacidad del momento plástico, por lo que la norma australiana en “Procedure II” de AS/NZE 4673:2001 [12] permite la consideración del cálculo inelástico utilizando un factor de deformación a compresión  $C_y$  para determinar la deformación máxima a compresión y asumir una curvatura ideal elástica-plástica tensión-deformación de la sección transversal. En AS/NZE 4673:2001 [12] también se adopta la capacidad plástica para secciones huecas rectangulares.

### 2.5.3 Continuous Strength Method (CSM): Formulación para resistencia de la sección transversal

El Continuous Strength Method (CSM) propuesto por Gardner y Nethercot, se considera un nuevo método de cálculo basado en criterios deformacionales, el cual actualmente aún se está desarrollando. El método tiene en cuenta el comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable y permite tener en cuenta el endurecimiento por deformación. El método fue desarrollado primeramente para acero inoxidable austenítico y dúplex por Afshan and Gardner [16] y posteriormente adaptado para acero inoxidable ferrítico por Bock et al. [17].

Una de las principales características del CSM es que substituye el paso previo, como en las normas anteriormente mencionadas, de la clasificación de sección, basándose únicamente en la esbeltez relativa de la pieza.

El CSM está basado en dos partes fundamentales:

1. Una curva base que define el nivel de deformación que puede soportar una sección transversal en su forma normalizada en función de la esbeltez de la sección transversal.
2. Un modelo de material bilineal que permite obtener la tensión correspondiente a la máxima deformación y permite tener en cuenta los efectos de endurecimiento

por deformación y que se utiliza para determinar la resistencia de la sección transversal.

Así pues con estas dos bases fundamentales del CSM, proporciona la relación entre la capacidad de deformación de las secciones transversales y la deformación total correspondiente al límite elástico  $\varepsilon_{CSM}/\varepsilon_y$ , la cual es necesaria para la determinación de las resistencias seccionales. La curva base se define a partir de las ecuaciones (2.8) y (2.9). Dicha curva base se define en función de la esbeltez seccional  $\lambda_p$  que se puede determinar según (2.10).

La ecuación (2.8) permite tener en cuenta los efectos del endurecimiento por deformación en secciones robustas mientras que la ecuación (2.9) permite calcular la capacidad de las secciones esbeltas sin tener que utilizar en el cálculo las características de las secciones eficaces.

$$\frac{\varepsilon_{CSM}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\lambda_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) \text{ para } \lambda_p \leq 0,68 \quad (2.8)$$

$$\frac{\varepsilon_{CSM}}{\varepsilon_y} = \left(1 - \frac{0,222}{\lambda_p^{1,05}}\right) \frac{1}{\lambda_p^{1,05}} \text{ para } \lambda_p > 0,68 \quad (2.9)$$

$$\lambda_p = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}} \quad (2.10)$$

Donde  $\sigma_{cr}$  es la tensión crítica de abolladura local que se calcula según (2.11). La deformación total correspondiente al límite elástico  $\varepsilon_y$  equivale a  $f_y/E + 0,002$ , donde  $f_y$  es el límite elástico del acero y E su módulo elástico.  $\varepsilon_u$  es la deformación correspondiente a la resistencia última,  $C_1$  es un coeficiente que define el modelo del material según el tipo de acero inoxidable o su conformación, para acero inoxidable austenítico, como es el caso de estudio,  $C_1 = 0,10$ .

$$\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} \quad (2.11)$$

La resistencia de la sección transversal a compresión  $N_{csm}$  se calcula según la expresión (2.12) asumiendo un límite superior de tensión  $\sigma_{csm}$  en la sección transversal y la capacidad resistente de flexión  $M_{csm}$  se obtiene según la expresión (2.13). La máxima tensión  $\sigma_{csm}$  y el módulo de endurecimiento por deformación  $E_{sh}$  se obtienen por una modelo simplificado de material bilineal que considera los efectos del endurecimiento por deformación desarrollado por Ashfan y Gardner [16] para aceros inoxidables austeníticos y dúplex.

$$N_{csm} = \frac{\sigma_{csm} A}{\gamma_{M0}} \quad (2.12)$$

$$M_{csm} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^{-2} \right] \quad (2.13)$$

#### 2.5.4 Direct Strength Method (DSM): Formulación para resistencia de la sección transversal

El Direct Strength Method (DSM) es un nuevo método avanzado de diseño que ya ha sido adoptado por la “American Iron and Steel Institute”, y ha tenido una rápida aceptación debido a su simplicidad para diseñar secciones transversales complejas. Su base se centra en la abolladura local de secciones, pero actualmente se ha extendido y avanzado mucho. Los creadores de esta nueva metodología para el cálculo de elementos de piezas de acero inoxidable fueron Schafer y Pekoz [18].

El Direct Strength Method (DSM) considera el efecto de la abolladura local reduciendo la resistencia de la sección transversal mediante una curva de resistencia sin tener que calcular ninguna propiedad efectiva de la sección transversal.

La resistencia nominal de una sección transversal de acero al carbono  $R_{nl}$  se obtiene reduciendo la carga de plastificación  $R_y$  debido al efecto de la abolladura local en función de la esbeltez como se representa en la ecuación (2.14) para las secciones de acero al carbono. La esbeltez de la sección transversal se obtiene según la expresión (2.15), donde  $R_{crl}$  corresponde a la carga crítica elástica de abolladura local, que se puede obtener mediante métodos numéricos y programas de software basados en elementos finitos, aunque también puede estimarse analíticamente.

$$\frac{R_{nl}}{R_y} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \frac{1}{\lambda_l^{0,8}} - \frac{0,15}{\lambda_l^{1,6}} & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{R_y}{R_{crl}}} \quad (2.15)$$

Bezkorovainy et al. [19], continuó el estudio de DSM para placas de acero inoxidable sometidas a un esfuerzo uniforme de compresión a partir de diferentes ensayos y el cálculo de elementos finitos. Becque et al. [20] a partir de ensayos en elementos de sección abierta de acero inoxidable siguió con el estudio, basándose en el DSM implementado en AS/NZS4600 [12], encontró un límite diferente según la esbeltez de la sección transversal. La ecuación (2.16) presenta esta nueva curva.

$$\frac{R_{nl}}{R_y} = \begin{cases} 1 & \text{para } \lambda_l \leq 0,474 \\ \left( \frac{0,95}{\lambda_l^{0,8}} - \frac{0,22}{\lambda_l^{1,6}} \right) & \text{para } \lambda_l > 0,474 \end{cases} \quad (2.16)$$

Posteriormente Rossi y Rasmussen [22] incluyeron en la formulación del DSM el endurecimiento por deformación que sufre el acero inoxidable adoptando una expresión lineal relativa a la resistencia de la sección transversal y su esbeltez. Esta formulación se presenta en la ecuación (2.17), donde se expone la resistencia considerando el endurecimiento por deformación mientras se reduce la interacción de la resistencia de abolladura  $R_{enh\_nl}$ .

En 2016 Arrayago et al. [23] realiza una simple modificación de la ecuación de Rossi y Rasmussen [22] considerando un límite de esbeltez diferente pero con el mismo procedimiento, que se puede observar en la expresión (2.18), para la determinación de la resistencia de secciones tubulares de acero inoxidable.

$$\frac{R_{enh\_nl}}{R_y} = \begin{cases} 1 + (1 - 2,1\lambda_l) \left( \frac{\sigma_u}{f_y} - 1 \right) & \text{para } \lambda_l \leq 0,474 \\ \left( \frac{0,95}{\lambda_l^{0,8}} - \frac{0,22}{\lambda_l^{1,6}} \right) & \text{para } \lambda_l > 0,474 \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\frac{R_{enh\_nl}}{R_y} = \begin{cases} 1 + (1 - 1,29\lambda_l) \left( \frac{\sigma_u}{f_y} - 1 \right) & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left( \frac{0,95}{\lambda_l^{0,8}} - \frac{0,15}{\lambda_l^{1,6}} \right) & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (2.18)$$

Shifferaw y Schafer [24] implementan en el DSM el comportamiento inelástico para secciones huecas robustas, como también se tiene en cuenta en “Procedure II” en AS/NZE 4673:2001 [12] pero enfocado a vigas en C y Z de acero al carbono.

## 2.6 Estudios experimentales previos

En este apartado se resumirá brevemente todos aquellos ensayos realizados hasta el momento en secciones huecas rectangulares o cuadradas de acero inoxidable austenítico.

La campaña experimental se realizará de stub columns, que son pilares con poca longitud para la determinación de la resistencia a compresión de las secciones transversales de manera que los efectos de la inestabilidad global no aparezcan, y de vigas sometidas a flexión. En la Tabla 2.5 y Tabla 2.6 se puede observar los ensayos respectivamente.



**Tabla 2.5: Ensayos previos de stub columns a compresión**

Tipo acero inoxidable	Grado	Referencia	Nº ensayos
<b>Austenítico</b>	1.4306	Rasmussen et al. [26]	2
	1.4301	Talja and Salmi [28]	3
	1.4301	Kuwamura et al. [29]	6
	1.4318	Kuwamura et al. [29]	6
	1.4301	Liu and Young [30]	4
	1.4301	Young and Liu [31]	8
	1.4301	Gardner et al. [32]	33
	1.4318	Gardner et al. [32]	8
	1.4301	Young and Liu [34]	3
	1.4301 1.4571 1.4307 1.4404	Zhao et al. [35]	4
	1.4301	Singh et al. [40]	4
	1.4301	Fang et al. [41]	2

**Tabla 2.6: Ensayos previos de vigas a flexión**

Tipo acero inoxidable	Grado	Referencia	Nº ensayos
<b>Austenítico</b>	1.4306	Rasmussen et al. [27]	1
	1.4301	Talja and Salmi [28]	9
	1.4301	Gardner et al. [33]	9
	1.4301	Zhou and Young [36]	14
	1.4301	Real et al. [37]	2

	1.4318	Gardner et al. [38]	6
	1.4301 1.4307	Theofanous et al. [39]	5
	1.4301	Zhao et al. [35]	4
	1.4301 1.4307	Gkantou et al. [42]	4

## 3 PREPARACIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 3.1 Introducción

En este capítulo se explicará todo aquello necesario para la realización de los ensayos. Primeramente se hablará sobre los datos necesarios para realizar una caracterización de material, explicando el contenido químico de los especímenes a ensayar, seguidamente las mediciones de las imperfecciones locales. Y para acabar se explicará los cálculos de elementos finitos que se realizaron para tener una guía de cómo encarar los ensayos.

### 3.2 Caracterización y medición de la geometría

Para realizar los ensayos experimentales de la manera más exacta, y que por otra parte es esencial para un buen modelado y análisis, se requiere un estudio previo de la geometría y material de los especímenes a estudiar. En este apartado se definirá las características del material, sus propiedades mecánicas y la medida de las imperfecciones locales iniciales geométricas.

Los especímenes, como se ha comentado con anterioridad son secciones rectangulares huecas (RHS) y se estudiarán cuatro secciones transversales diferentes y para cada una de ellas se realizará un ensayo de compresión y uno de flexión. En la Tabla 3.1 se exponen las medidas de la sección transversal (HxBxt) donde H es la altura de la sección, B el ancho y t el espesor.

**Tabla 3.1: Geometría y nomenclatura de las secciones transversales estudiadas**

	<b>Dimensiones [mm]</b>
<b>S1</b>	120x80x6
<b>S2</b>	100x80x4
<b>S3</b>	120x40x4
<b>S4</b>	200x100x3

### 3.2.1 Caracterización de material

Los especímenes que serán ensayados están realizados con acero inoxidable austenítico 1.4301. Su composición química y sus propiedades mecánicas y técnicas han sido suministradas por la fábrica donde se han realizado. Estos datos han sido extraídos de los Mill Certificates y se reflejan en las Tabla 3.2 y Tabla 3.3. En las propiedades mecánicas obtenemos  $\sigma_{0.2}$  y  $\sigma_{1.0}$  que son las tensiones de prueba correspondientes al 0.2% y 1.0% de deformaciones plásticas,  $\sigma_u$  es la resistencia máxima a tracción,  $\epsilon_f$  es la tensión en fractura y HRB la dureza del material.

**Tabla 3.2: Composición química de Mill Certificate**

	<b>C</b> [%]	<b>Si</b> [%]	<b>Mn</b> [%]	<b>P</b> [%]	<b>S</b> [%]	<b>Cr</b> [%]	<b>Ni</b> [%]	<b>Mo</b> [%]	<b>N</b> [%]
<b>S1</b>	0,027	0,450	1,430	0,032	0,001	18,050	8,010	--	0,066
<b>S2</b>	0,024	0,330	1,680	0,028	0,001	18,010	8,050	0,230	0,069
<b>S3</b>	0,020	0,330	1,690	0,026	0,001	18,090	8,020	0,170	0,069
<b>S4</b>	0,030	0,300	1,720	0,027	0,001	18,010	8,000	0,230	0,060

**Tabla 3.3: Propiedades mecánicas según Mill Certificate**

	<b><math>\sigma_{0.2}</math></b> [MPa]	<b><math>\sigma_{1.0}</math></b> [MPa]	<b><math>\sigma_u</math></b> [MPa]	<b><math>\epsilon_f</math></b> [%]	<b>HRB</b>
<b>S1</b>	302	339	628	58	87
<b>S2</b>	290	343	625	57,5	83
<b>S3</b>	282	318	638	55,6	83
<b>S4</b>	307	347	639	52,0	84

La sección transversal 1 se realizó con un fabricante diferente por una decisión externa a la campaña experimental, por lo que su composición química no contiene molibdeno.

### 3.2.2 Mediciones de imperfecciones locales

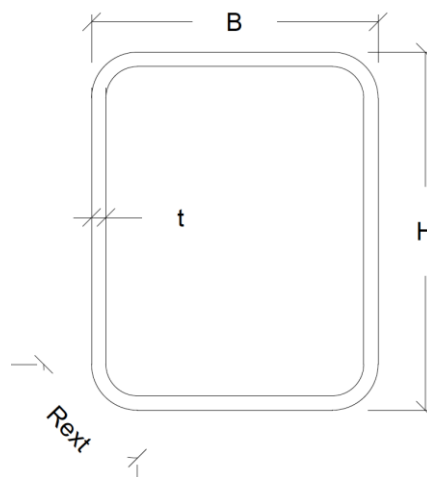
Cuando el material necesario llega al laboratorio siempre existen pequeñas imperfecciones debido a las intervenciones de máquinas y al posible error humano, y por lo tanto es una práctica común, antes de realizar cualquier ensayo, verificar las dimensiones y evaluar las imperfecciones de las piezas.

La longitud de los especímenes a ensayar a compresión fue escogida para ser los suficientemente cortos para evitar la abolladura local, pero con suficiente longitud para poder apreciar las tensiones e imperfecciones cuando se realice el ensayo. Según EN1993-1-3 en el anejo A [24] se determina que la longitud del espécimen para no sufrir efectos de inestabilidad global el espécimen debe de tener una longitud de al menos tres veces del elemento plano con mayor longitud que forme la sección transversal. En la Tabla 3.4 se observa la dimensión de la sección transversal del stub column, su longitud.

**Tabla 3.4: Longitud de los stub columns ensyados**

	Dimensiones [mm]	Longitud [mm]
<b>S1-SC</b>	120x80x6	360
<b>S2-SC</b>	100x80x4	300
<b>S3-SC</b>	120x40x4	360
<b>S4-SC</b>	200x100x3	600

El primer paso en la preparación de la campaña experimental es realizar la medición de la sección transversal y longitudinal para saber qué ha llegado de fábrica. Según la Figura 3.1, se explica de qué manera se midió cada espécimen y en la Tabla 3.5 se resumen los datos de cada medida realizando la media aritmética de las mediciones realizadas, donde  $L$  es la longitud,  $B$  es la base,  $H$  la altura,  $t$  es el espesor y  $R_{ext}$  es el radio exterior.



**Figura 3.1: Definición de los símbolos de la sección transversal**

**Tabla 3.5: Medidas reales de las dimensiones iniciales de los especímenes**

		<b>L1</b> [mm]	<b>L2</b> [mm]	<b>B</b> [mm]	<b>H</b> [mm]	<b>t</b> [mm]	<b>R<sub>ext</sub></b> [mm]
<b>S1</b> <b>(120x80x6)</b>	Stub column	360,0	360,0	119,8	80,0	6,0	19,5
	Viga	1701,0	1700,0	120,0	80,0	6,0	21,1
<b>S2</b> <b>(100x80x4)</b>	Stub column	300,0	299,6	100,2	80,6	3,9	12,7
	Viga	1700,0	1700,0	99,8	79,8	3,9	12,9
<b>S3</b> <b>(120x40x4)</b>	Stub column	360,0	360,5	120,0	41,5	3,9	12,6
	Viga	1701,0	1700,0	120,0	41,1	3,9	12,2
<b>S4</b> <b>(200x100x3)</b>	Stub column	600,0	600,1	199,1	103,3	2,8	8,1
	Viga	1702,0	1702,0	199,0	103,0	2,8	10,5

La determinación de las imperfecciones locales en stub columns se realizó mediante la colocación de cada espécimen en una fresadora, que es la encargada de mecanizar el movimiento para la toma de datos, y se realizaron las mediciones en cada cara del espécimen. Se decidió realizar más de una medición por cara, de esta manera, tener un resultado más próximo a la realidad.

La toma de datos se midió con un transformador LVDT (Linear Variable Differential Transformer) y los resultados obtenidos se grabaron en un sistema de adquisición de datos. Antes de empezar con la medición hay que calibrar la medición del sensor LVDT y comprobar que éste mide correctamente, en la Figura 3.2 se puede observar todo el mecanismo para la medición longitudinal de las imperfecciones locales en stub columns.



**Figura 3.2: Mediciones de las imperfecciones locales en stub columns**

La toma de datos se realizó con una frecuencia para grabar de 2 s<sup>-1</sup>, es decir, dos datos grabados por cada segundo, con una velocidad de pasada de 264 mm/min y con el

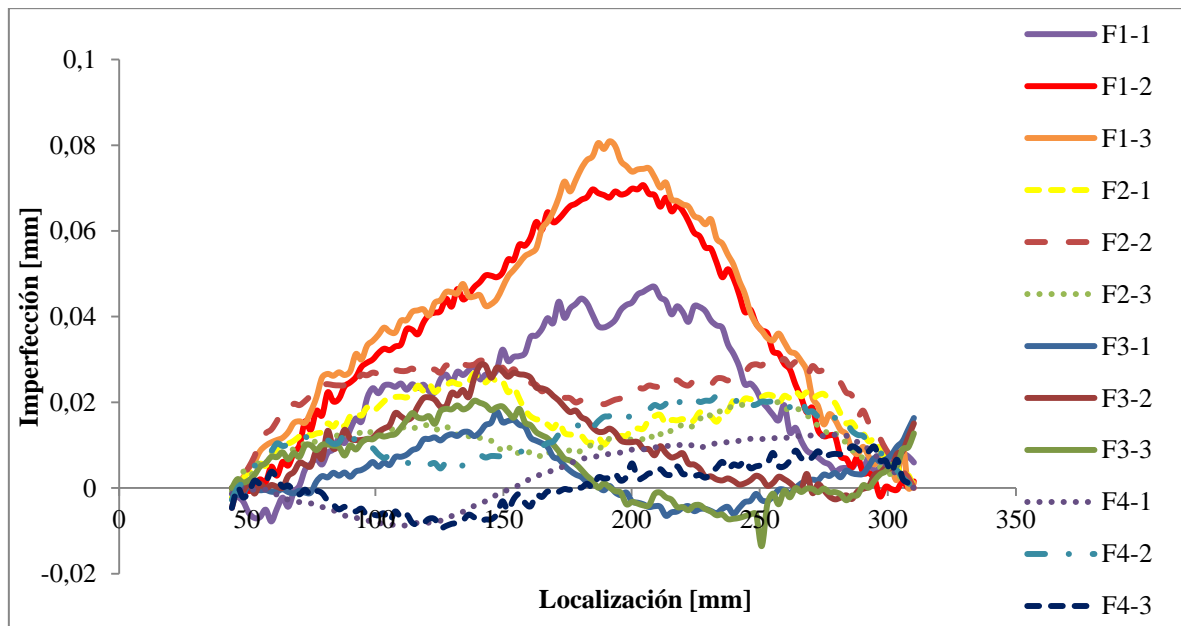
MGCplus como sistema de adquisición de datos y registrando todo el procedimiento con el software Catman Easy.

A partir del procedimiento explicado anteriormente se realiza el tratamiento de datos obtenidos por el sensor LVDT. Teniendo en cuenta que en cada cara se realizó más de una medición obtenemos los resultados de las mediciones de las imperfecciones locales de cada stub column.

Hay que tener en cuenta que la localización de las mediciones de las imperfecciones locales no empieza ni acaba en el inicio de cada espécimen con el objetivo de evitar que las mediciones se vean influenciadas por las operaciones de corte, por lo que los primeros y últimos 50 mm no se consideraron en la medición.

Las imperfecciones se muestran en función de la posición longitudinal del elemento y la medición de cada cara, por lo que F1-1 corresponde a la lectura 1 de la cara 1, F1-2 a la lectura 2 de la cara 1, así pues la nomenclatura corresponde a FX-Y, donde X es la cara del espécimen y Y la lectura por cara.

Para las mediciones para el espécimen S1-SC 120x80x6, se decidieron realizar tres mediciones por cada cara obteniendo un resultado como se muestra en la Figura 3.3.



**Figura 3.3: Mediciones de las imperfecciones locales S1-SC 120x80x6**

Para las mediciones para el espécimen S2-SC 100x80x4, se decidieron realizar tres mediciones en la cara larga y dos mediciones en la cara corta obteniendo un resultado como se muestra en la Figura 3.4.

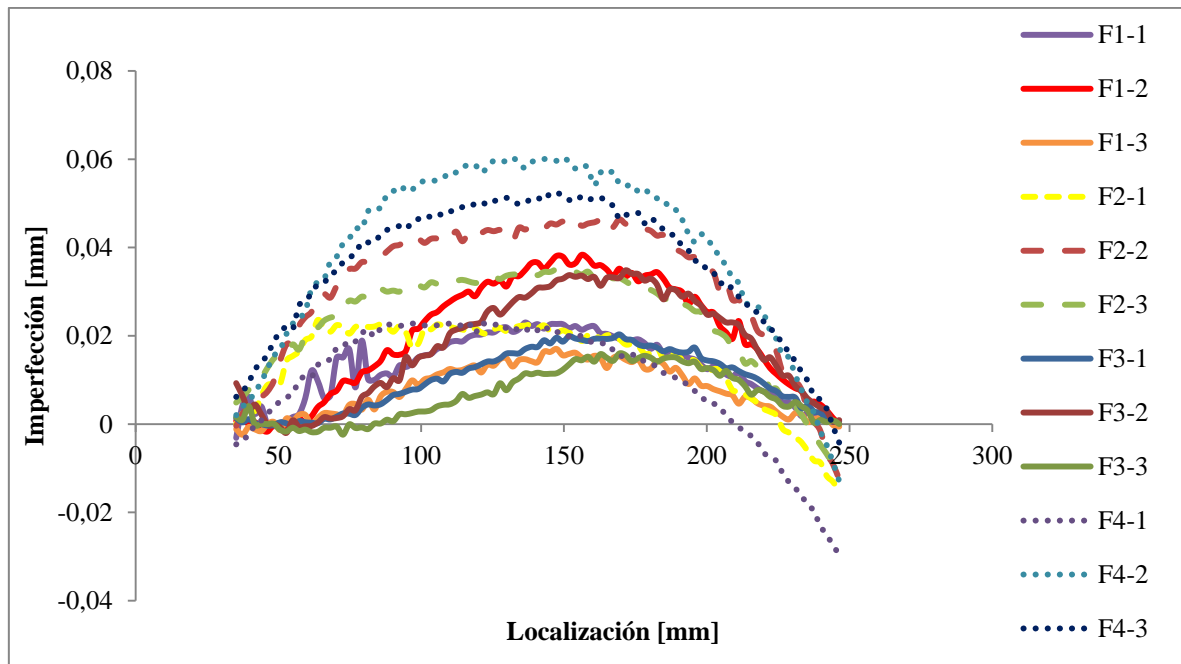


Figura 3.4: Mediciones de las imperfecciones locales S2-SC 100x80x4

Para las mediciones para el espécimen S3-SC 120x40x4, se decidieron realizar tres mediciones en la cara larga y dos mediciones en la cara corta obteniendo un resultado como se muestra en la Figura 3.5.

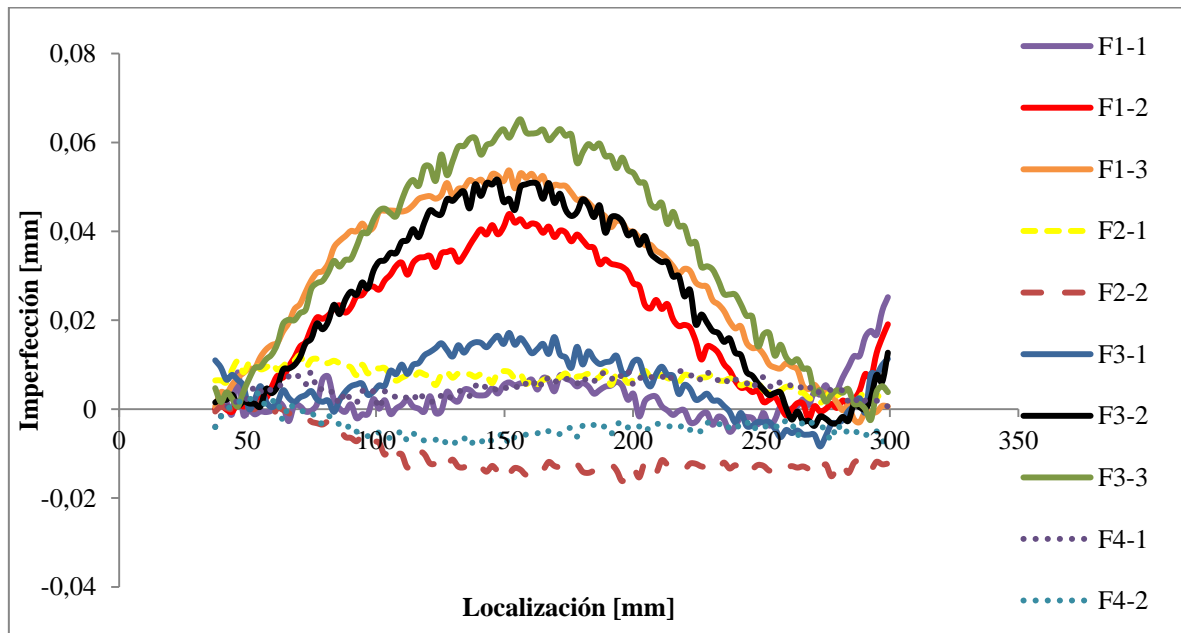


Figura 3.5: Mediciones de las imperfecciones locales S3-SC 120x40x4

Para las mediciones para el espécimen S4-SC 200x100x3, se decidieron realizar cinco mediciones en la cara larga y tres mediciones en la cara corta a causa de las mayores dimensiones de esta sección obteniendo un resultado como se muestra en la Figura 3.6.



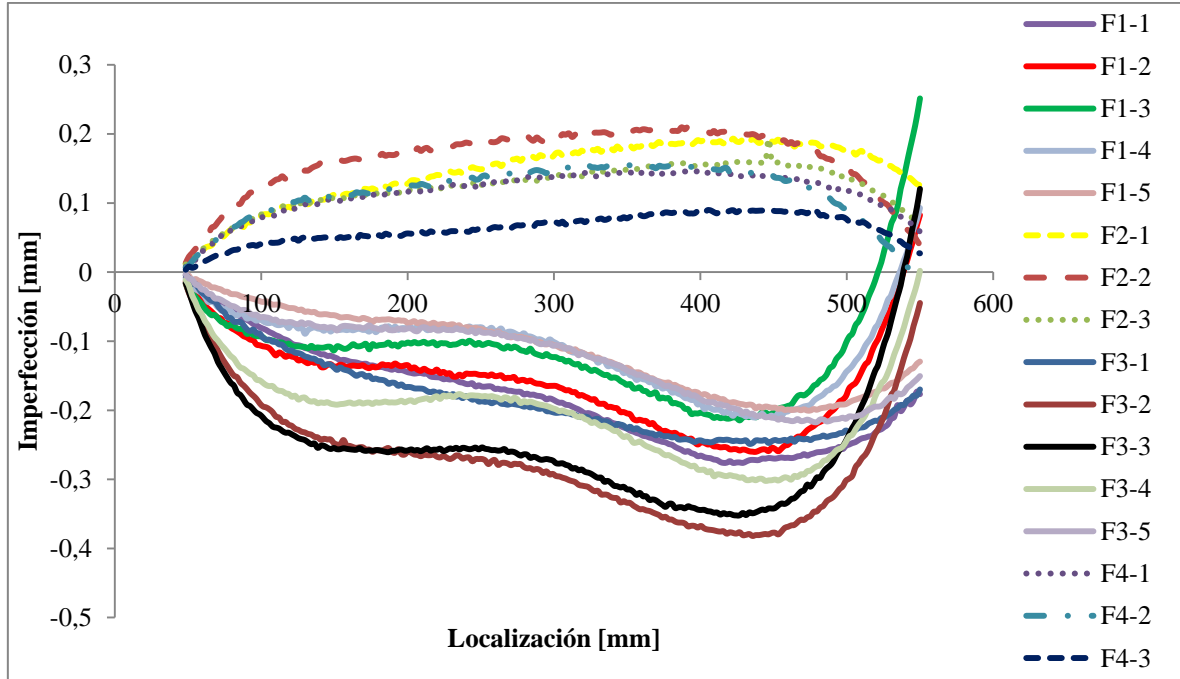


Figura 3.6: Mediciones de las imperfecciones locales S4-SC 200x100x3

En la Tabla 3.6 se presenta la magnitud de la imperfección  $w_0$  que se obtiene de la media de la imperfección máxima en cada cara y finalmente la imperfección total en el espécimen.

Tabla 3.6: Magnitud imperfección  $w_0$  para los diferentes stub columns

	$w_0$ , cara 1 [mm]	$w_0$ , cara 2 [mm]	$w_0$ , cara 3 [mm]	$w_0$ , cara 4 [mm]	$w_0$ , max [mm]
<b>S1-SC</b>	0,0809	0,0301	0,0286	0,0216	0,0809
<b>S2-SC</b>	0,0383	0,0464	0,0348	0,0604	0,0604
<b>S3-SC</b>	0,0537	0,0121	0,0652	0,0087	0,0652
<b>S4-SC</b>	0,2514	0,2107	0,1205	0,1559	0,2514

Como se puede observar en la Tabla 3.6 la sección que tiene una magnitud de imperfección más alta es la sección más esbelta, SC-S4 y las menores amplitudes corresponden a las secciones más robustas.

### 3.3 Modelos numéricos preliminares

En este apartado se explicarán los modelos de elementos finitos elaborados por otros miembros del equipo de estudio que servirán como base para la elaboración de ensayos. Estos resultados servirán tanto para saber una estimación de la resistencia última que

podrán soportar los especímenes en los ensayos experimentales, como para su posterior tratamiento de datos y comparación de los ensayos con los cálculos preliminares.

Para la realización del cálculo de las secciones transversales es ideal realizar ensayos de las probetas de la zona plana y de las esquinas pero no se han podido realizar antes de la realización de los ensayos de las secciones transversales por lo que todas las características de material que se utilizan en el estudio son extraídas de otros estudios en los que se han realizado ensayos de elementos similares.

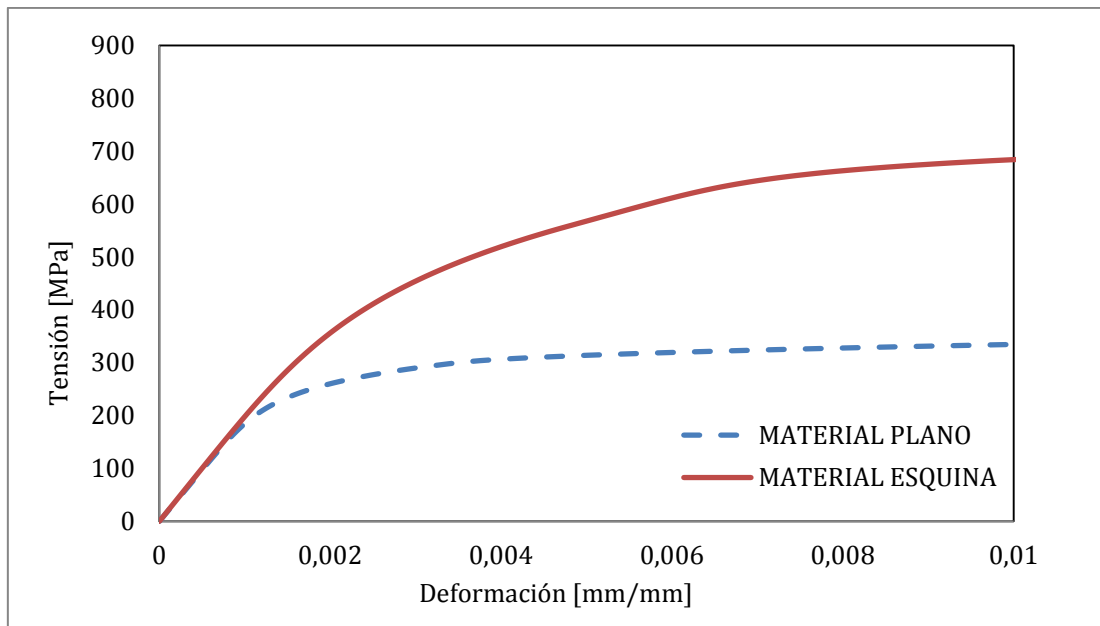
En la Tabla 3.7 se muestran los parámetros de material a utilizar según el estudio de Gardner y Nethercot [31] para secciones rectangulares huecas conformadas en frío de acero inoxidable austenítico 1.4301 similares a las estudiadas en este trabajo.

**Tabla 3.7: Valores de las propiedades del material**

	<b>Propiedades material plano</b>	<b>Propiedades material esquina</b>
<b>Grado</b>	1.4301	1.4301
<b>E [MPa]</b>	194114	200712
<b><math>\sigma_{0,2}</math> [MPa]</b>	301	558
<b><math>\sigma_u</math> [MPa]</b>	657	844
<b>m</b>	1,95	5,57
<b>n</b>	7,62	4,86

Donde m y n son los coeficientes que se utilizan en los modelos analíticos del material para representar el comportamiento no lineal del material.

Según estudios realizados previamente se obtiene el comportamiento de material tensión-deformación obtenidas a partir de los parámetros de la Tabla 3.7 con un modelo analítico del material citado con anterioridad que corresponde al de Mirambell y Real [5]. En la Figura 3.7 se expone el comportamiento del material plano y de las esquinas de elementos conformados en frío.

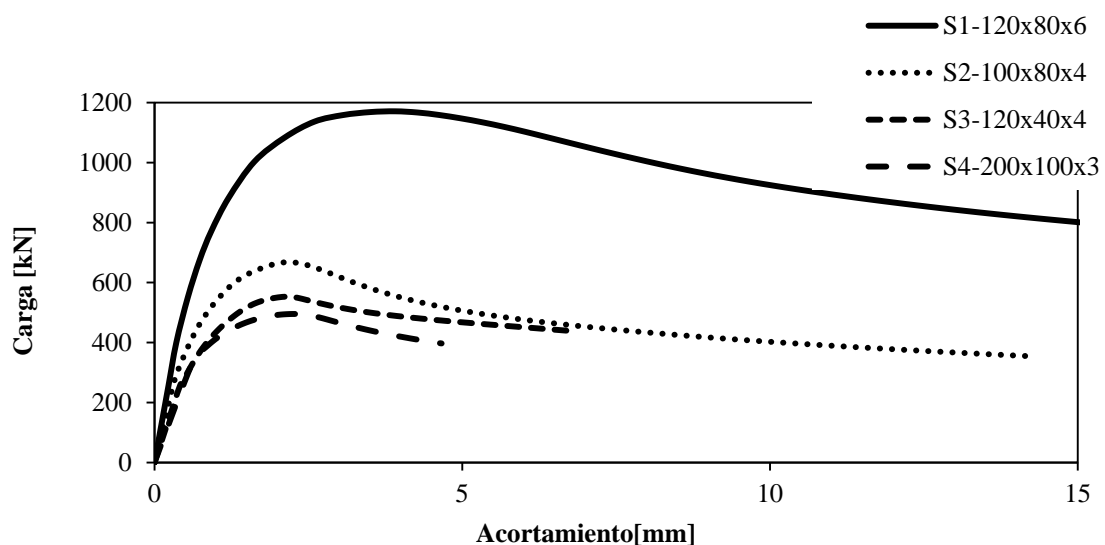


**Figura 3.7: Comportamiento tensión-deformación de las zonas planas y de las esquinas en elementos conformados en frío de acero inoxidable austenítico.**

La configuración estructural de los ensayos que se quiere realizar será, para stub columns sometidos a compresión pura bajo condiciones de contorno de empotramiento en ambos extremos con el objetivo de determinar la resistencia a compresión y para vigas biapoyadas sometidas a dos cargas puntuales situadas aproximadamente a un tercio de la longitud para estimar la resistencia a flexión.

Los modelos de elementos finitos se realizaron utilizando el software Abaqus y se obtienen los siguientes valores de stub columns a compresión y vigas a flexión.

La Figura 3.8 representa la gráfica carga-acortamiento de las cuatro secciones de stub columns y la Tabla 3.8, sus valores numéricos de las cargas últimas y acortamientos predichos.

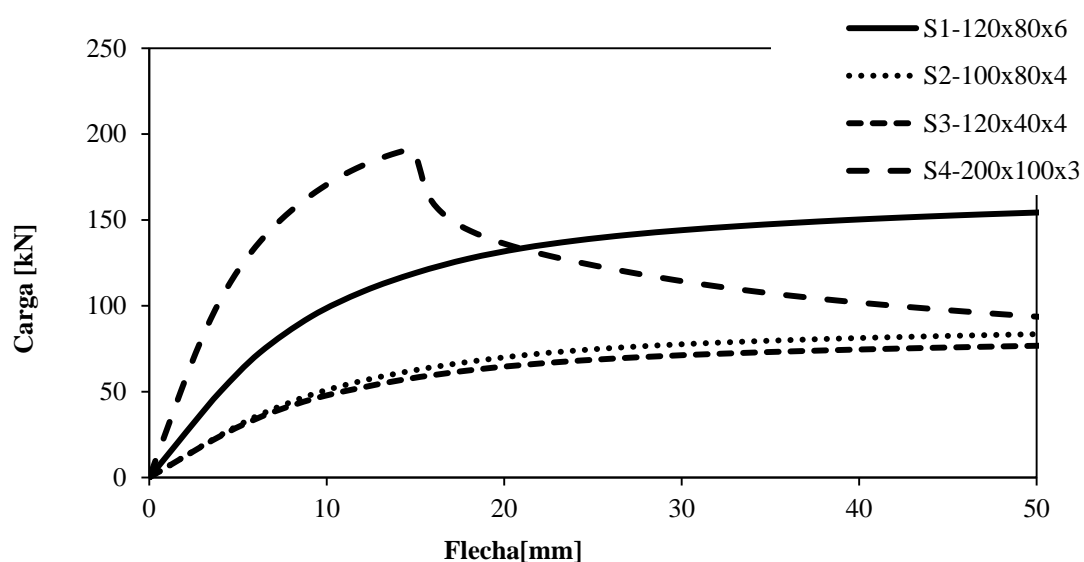


**Figura 3.8: Curvas numéricas de carga-acortamiento para stub columns**

**Tabla 3.8: Valores de cálculo preliminares para stub columns FE**

	$N_u$ [kN]	$d_u$ [mm]
<b>S1-120x80x6</b>	1171,0	3,9
<b>S2-100x80x4</b>	668,0	2,2
<b>S3-120x40x4</b>	553,0	2,2
<b>S4-200x100x3</b>	495,4	2,3

La Figura 3.9 representa, la relación carga-flecha de las cuatro vigas a ensayar y en la Tabla 3.9 los valores numéricos de las cargas últimas y flechas máximas estimadas numéricamente.



**Figura 3.9: Curvas numéricas de carga-flecha para vigas**

**Tabla 3.9: Valores de cálculo preliminares vigas FE**

	$F_u$ [kN]	$d_u$ [mm]
<b>S1-120x80x6</b>	171,1	174,8
<b>S2-100x80x4</b>	88,0	100,1
<b>S3-120x40x4</b>	93,2	251,0
<b>S4-200x100x3</b>	190,8	14,6

## 4 CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 4.1 Introducción

En este capítulo se explicará la campaña experimental realizada en el Laboratorio de Tecnología d'Estructures Lluís Agulló en la Universidad Politècnica de Catalunya para estudiar el comportamiento a compresión pura de stub columns y a flexión de vigas en el eje fuerte de sección hueca rectangular de acero inoxidable austenítico. Se realizaron un total de ocho ensayos, cuatro para stub columns y cuatro para vigas, que corresponden a las cuatro secciones transversales descritas en el capítulo anterior.

### 4.2 Stub Columns

#### 4.2.1 Configuración del ensayo

En este apartado se explicará el proceso de los ensayos realizados con los cuatro especímenes de stub columns de acero austenítico con secciones huecas rectangulares sometidas a compresión para determinar la resistencia a compresión de la sección transversal. Los ensayos fueron realizados en una INSTRON 8505 1000kN.

La INSTRON 8505 1000kN es una máquina servo hidráulica dotada de elevadores y bloqueo hidráulico y con un actuador en su parte superior. En la Tabla 4.1 se observan algunas de las características principales.

**Tabla 4.1: Características INSTRON 1000 kN**

<b>INSTRON 8505 1000 kN</b>
Fuerza axial de $\pm 1000$ kN
Marco con carga alineado con precisión
Elevador hidráulico y bloqueo de cruceta superior
Actuador en la cruceta superior

Todos los stub columns fueron ensayados bajo compresión pura aplicada con dos paneles paralelos en su cara superior e inferior.

La aplicación de la carga se realizó mediante control de desplazamiento del actuador a una velocidad de 0,5 mm/min, pero durante los ensayos se decidió reducir a 0,25 mm/min para reproducir de manera correcta el comportamiento post-abolladura de todos los especímenes.

Para un mayor control de los ensayos, a cada espécimen se le colocaron varias galgas extensométricas, que son unos sensores que miden la deformación que sufre cierto punto del material. En la Tabla 4.2 se muestran las características técnicas del sensor empleado en esta campaña experimental.

Para la colocación de las galgas y una correcta medición es necesario tener una zona completamente limpia y sin imperfecciones, por lo que previamente a la colocación del sensor, la zona indicada se debía lijar y pulir y encima de estos sensores se colocaron unos protectores contra la humedad y el polvo.

Se colocaron dos galgas en cada cara larga del espécimen a una distancia de cuatro veces el espesor desde la parte exterior del elemento. Se tomó la decisión de colocar en la cara larga del espécimen y a media altura ya que es la zona más susceptible de abollar.

En el stub column de mayor tamaño se decidió colocar una quinta galga en el centro de su cara más larga.

**Tabla 4.2: Características galga extensométricas**

	<b>Características</b>
<b>Tipo</b>	YFLA-5-5LJCT-F
<b>Longitud galga</b>	5 [mm]
<b>Calibración galga</b>	$2.11 \pm 2\%$
<b>Resistencia galga</b>	$119,5 \pm 0,5 \text{ } [\Omega]$
<b>Cables conectores</b>	3 [W] / 5 [m]

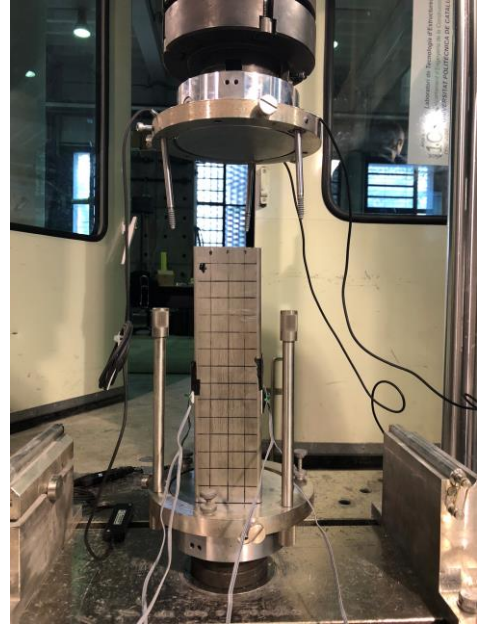
Para medir el acortamiento de los stub columns en cada ensayo se colocaron tres LVDT. La carga aplicada se mide mediante la célula de carga de la máquina. El sistema de adquisición de datos se realizó mediante el MGCPlus en un intervalo de  $2 \text{ s}^{-1}$ .

En la Figura 4.1a) se pueden apreciar los cuatro especímenes, con las galgas colocadas antes de ser ensayados. En estos se decidió realizar una cuadrícula para poder apreciar la abolladura que sufrirán una vez realizado el ensayo.

En la Figura 4.1b) se muestra el montaje de un ensayo, donde se aprecian las placas auxiliares que marcan el paralelismo para aplicar la carga a compresión, los LVDT y el espécimen colocado en su posición con la conexión de las galgas realizadas.



a) Especímenes preparados para ensayar



b) Montaje ensayo stub columns

**Figura 4.1: Preparación ensayos a compresión stub columns**

#### 4.2.2 Resultados de los ensayos

Los datos obtenidos por las galgas de deformación y los LVDT, que proporcionan el acortamiento del espécimen, han sido tratados, eliminando los efectos locales debidos a los asentamientos producidos por los diferentes elementos que componen la configuración del ensayo.

Para encontrar el acortamiento real de los stub columns  $\delta$ , debe eliminarse la deformación elástica de las placas a través de las cuales se introduce la carga en los elementos según lo establecido por Bock et al. [42].

La ecuación (4.1) define la manera de obtener el acortamiento real, donde  $\delta_{LVDT}$  es el acortamiento obtenido a partir de la corrección con los datos iniciales de los LVDT y  $\delta_{platen}$  es el acortamiento corregido de las pletinas que se obtiene según la expresión (4.2). De este modo se obtiene el acortamiento corregido.

$$\delta = \delta_{LVDT} - 2\delta_{platen} \quad (4.1)$$

$$\delta_{platen} = \frac{L}{2} \sigma \left( \frac{1}{E_{0,LVDT}} - \frac{1}{E_{0,true}} \right) \quad (4.2)$$

Donde  $L$  es la longitud del stub column,  $\sigma$  es la tensión en cada momento del ensayo, que se calcula como  $\sigma = F/A$ ,  $E_{0,LVDT}$  y  $E_{0,true}$  es el módulo de Young de la respuesta de los LVDT y las galgas respectivamente.

#### 4.2.2.1 Ensayo stub column S1-SC

El ensayo del stub column S1-SC con una sección 120x80x6 se realizó el día 15 de febrero del 2018. En la Figura 4.2 se muestran las curvas carga-acortamiento y en la Figura 4.3 se presenta los resultados obtenidos en relación tensión-deformación, la deformación corresponde a la obtenida de los sensores LVDT y de las galgas extensométricas.

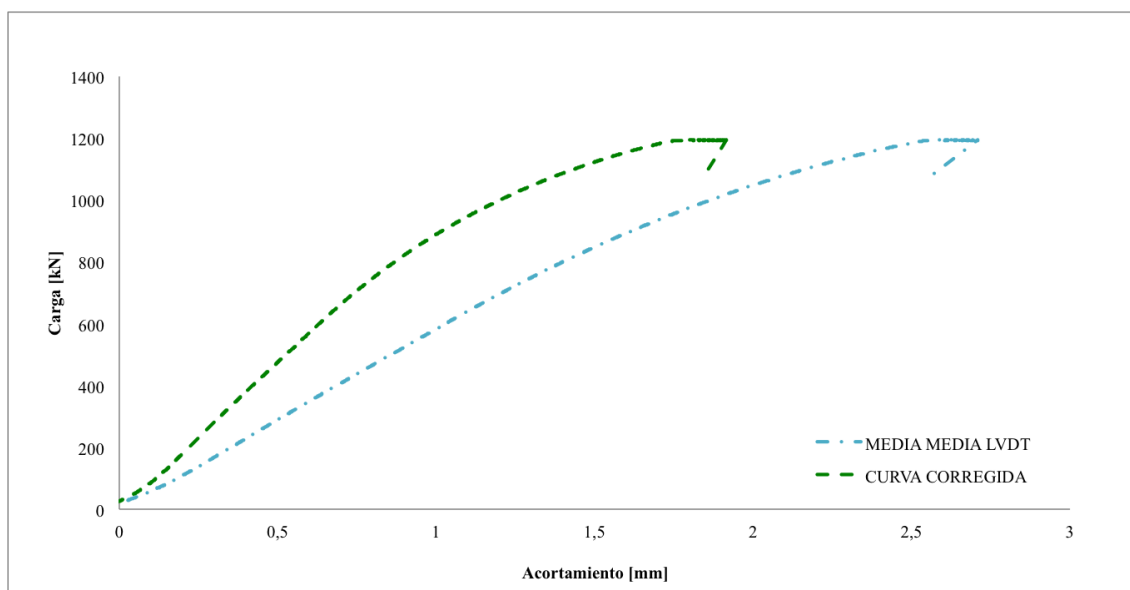


Figura 4.2: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S1-SC 120x80x6

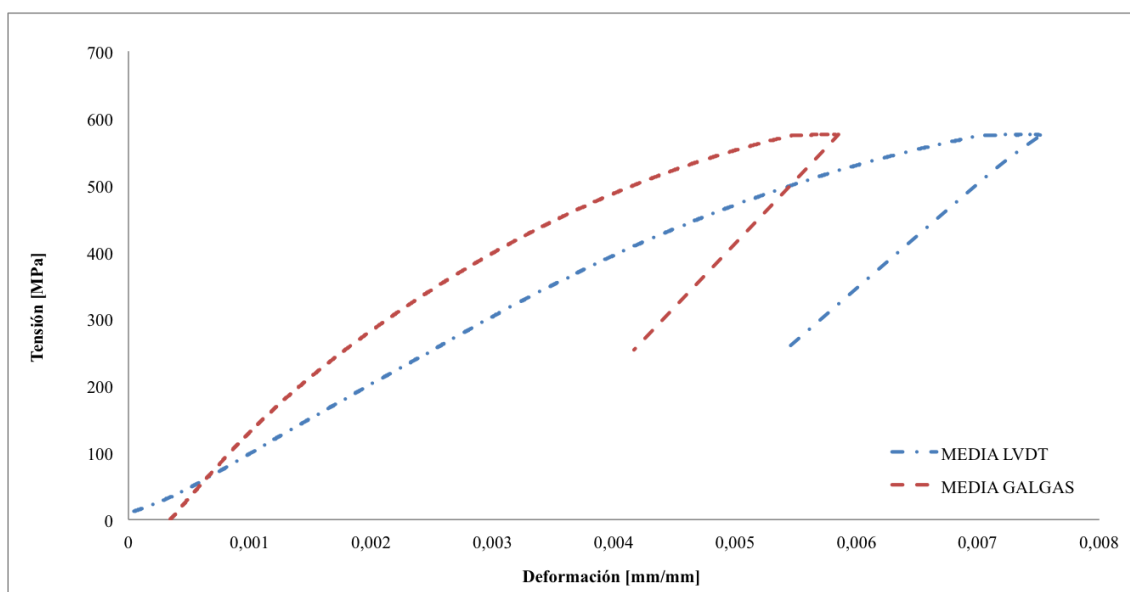


Figura 4.3: Curvas tensión - deformación para el espécimen S1-SC 120x80x6



En el ensayo del espécimen S1-SC llegó a la carga última pero al ser una sección muy robusta es capaz de deformarse mucho antes de que la curva carga-acortamiento empiece a descender, que es donde generalmente las abolladuras empiezan a ser visibles, por lo tanto se decidió parar el ensayo antes de apreciar abolladuras ya que nos encontrábamos con cargas muy altas.

#### 4.2.2.2 Ensayo stub column S2-SC

El ensayo del stub column S2-SC con una sección 100x80x4 se realizó el día 15 de febrero del 2018. En la Figura 4.4 se muestran las curvas carga-acortamiento y en la Figura 4.5 se presenta los resultados obtenidos en relación tensión-deformación.

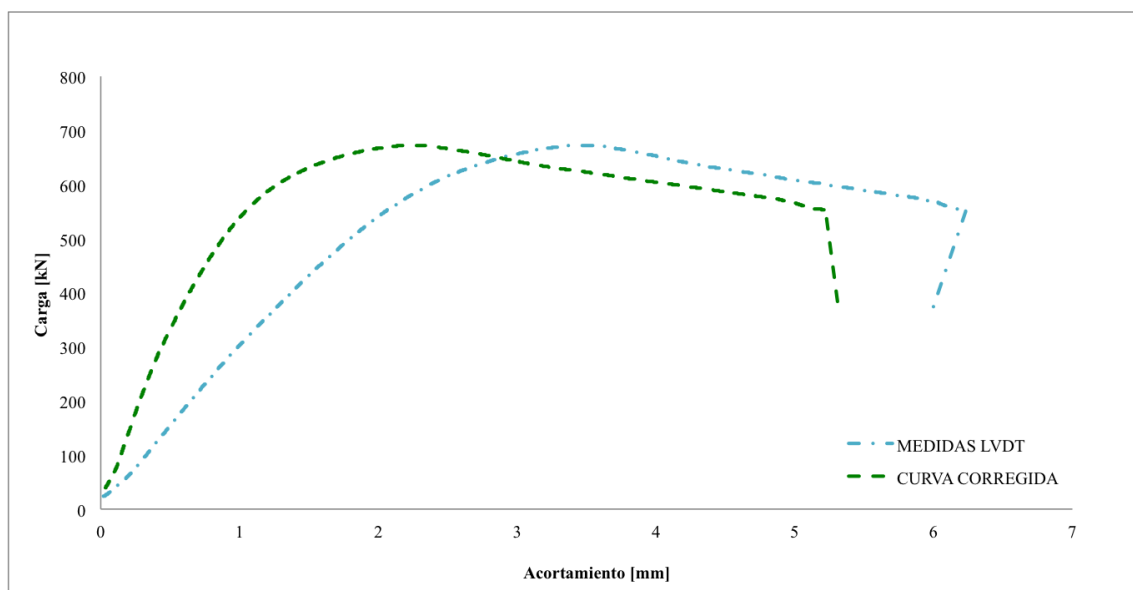


Figura 4.4: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S2-SC 100x80x4

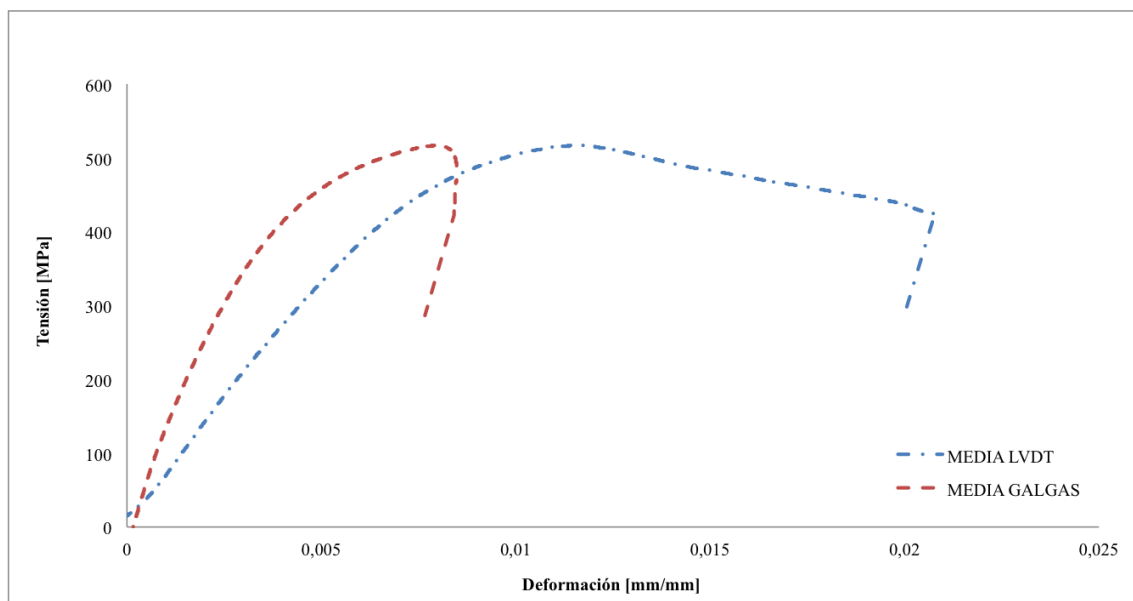


Figura 4.5: Curvas tensión - deformación para el espécimen S2-SC 100x80x4

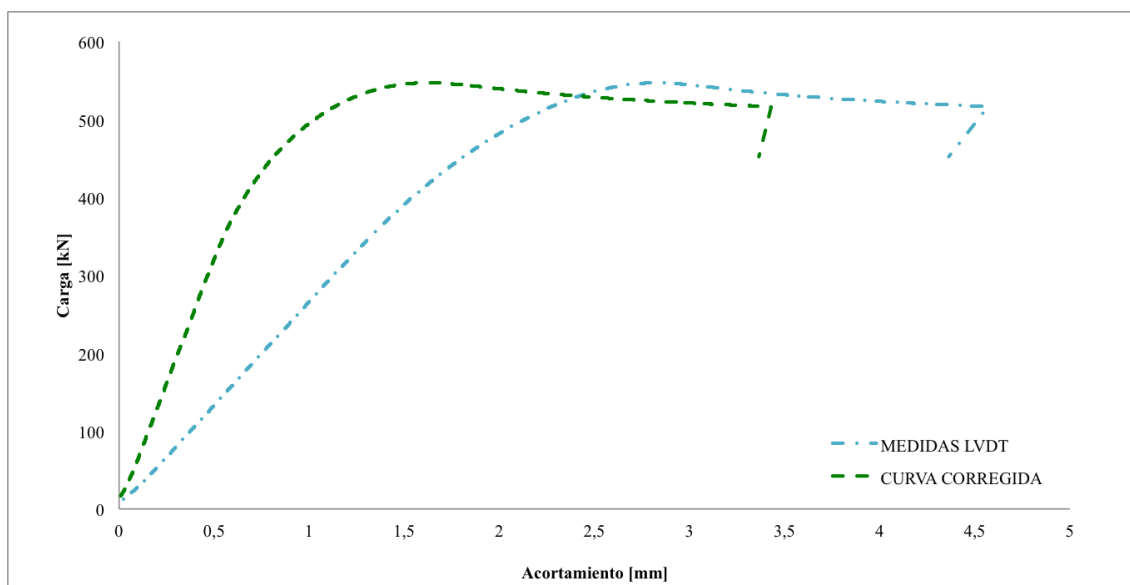


**Figura 4.6: S2-SC después del ensayo experimental**

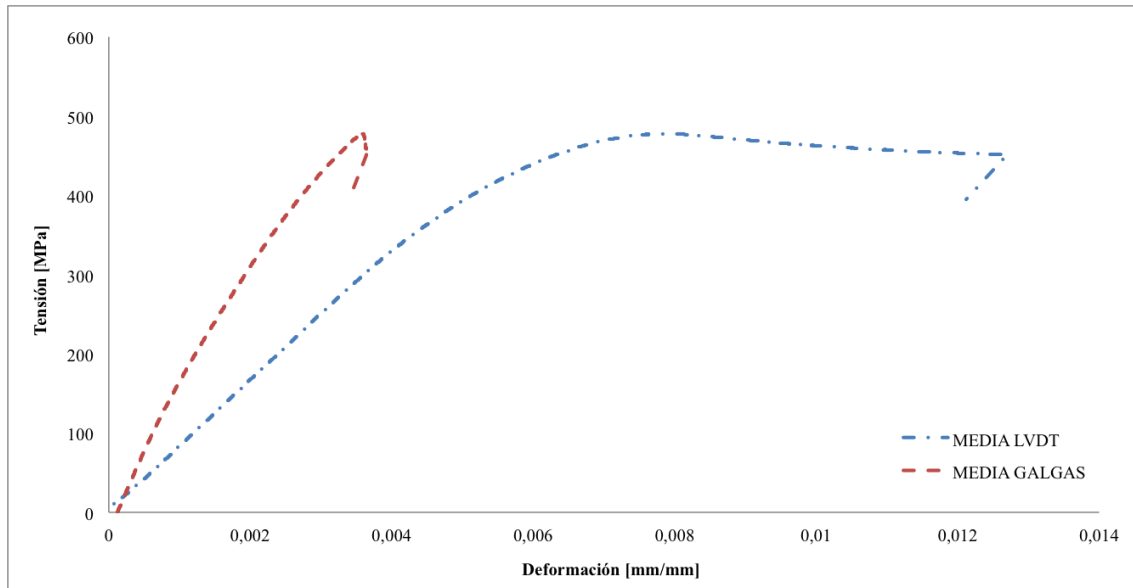
El espécimen falló por abolladura local. En la Figura 4.6 se muestra el stub column después de haber sido ensayado y donde se puede apreciar las curvas sinusoidales en la cara larga del espécimen.

#### *4.2.2.3 Ensayo stub column S3-SC*

El ensayo del stub column S3-SC con una sección 120x40x4 se realizó el día 16 de febrero del 2018. En la Figura 4.7 se muestran las curvas carga-acortamiento y en la Figura 4.8 se presenta los resultados obtenidos en relación tensión-deformación



**Figura 4.7: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S3-SC 120x40x4**



**Figura 4.8: Curvas tensión – deformación para el espécimen S3-SC 120x40x4**

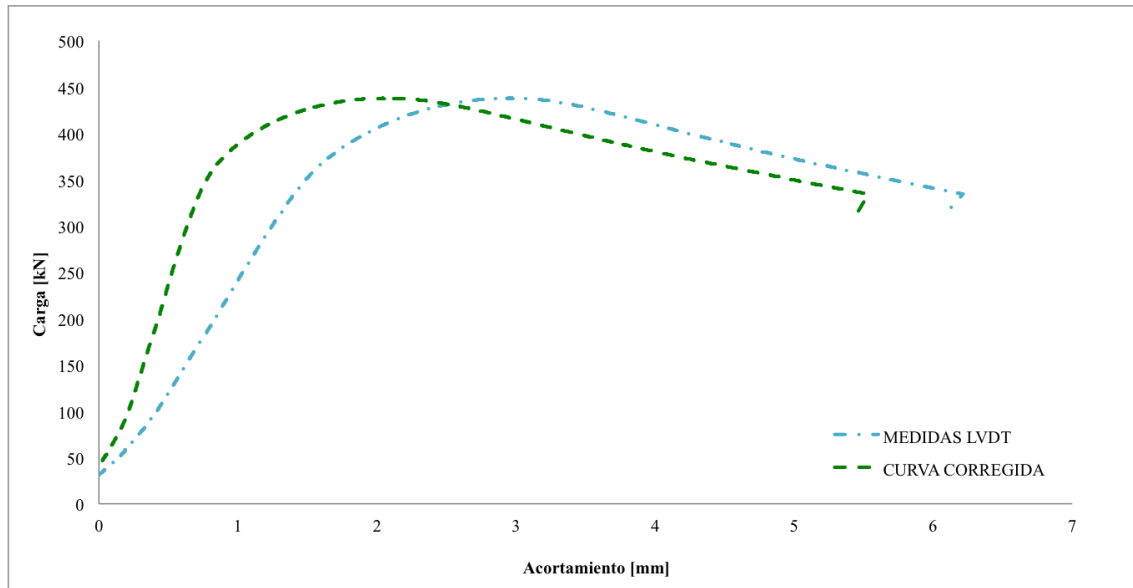


**Figura 4.9: S3-SC después del ensayo experimental**

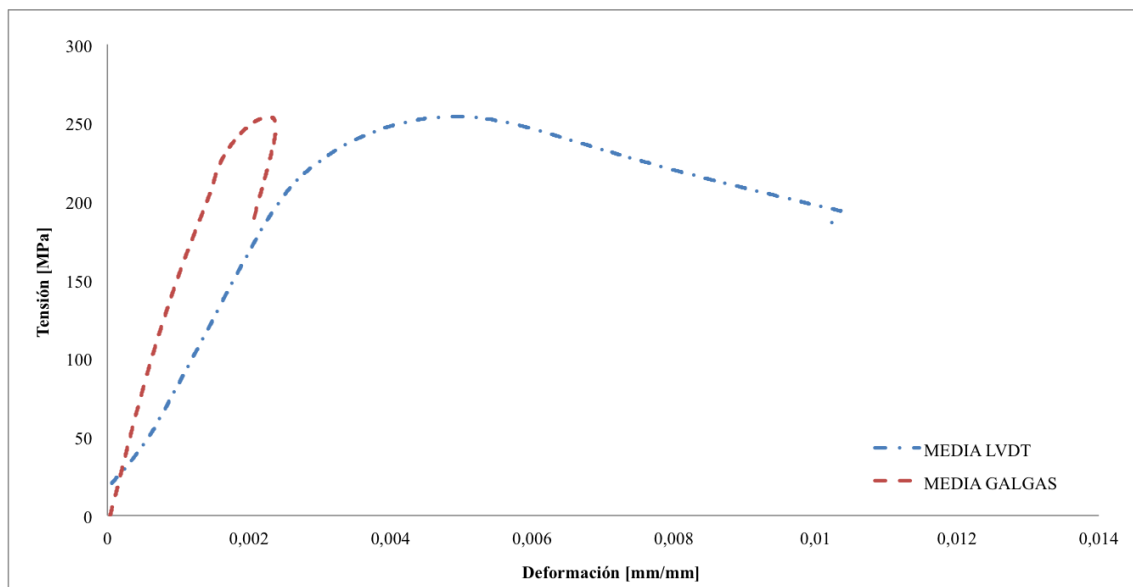
El espécimen falló por abolladura local. En la Figura 4.9 se muestra cómo el espécimen falló en la cara larga por debajo de las galgas.

#### **4.2.2.4 Ensayo stub column S4-SC**

El ensayo del stub column S4-SC con una sección 200x100x3 se realizó el día 16 de febrero del 2018. En la Figura 4.10 se muestran las curvas carga-acortamiento y en la Figura 4.11 se presenta los resultados obtenidos en relación tensión-deformación

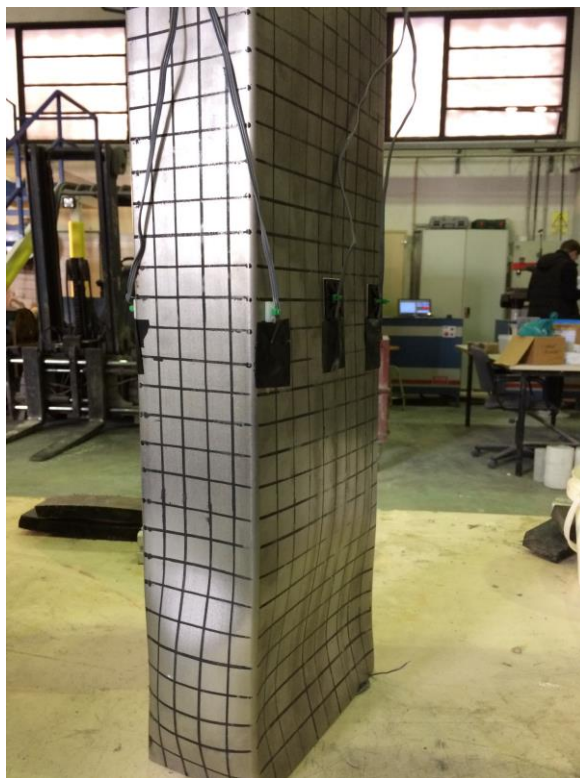


**Figura 4.10: Curvas carga - acortamiento para el espécimen S4-SC 200x100x3**



**Figura 4.11: Curvas tensión - deformación para el espécimen S4-SC 200x100x3**

El espécimen falló por abolladura local. En la Figura 4.12 se muestra el stub column después de haber sido ensayado.



**Figura 4.12: S4-SC después del ensayo experimental**

En la Tabla 4.3 se muestra un sumario de los ensayos realizados y el ratio según la carga última y la resistencia a compresión de la sección transversal bruta, que se calcula según la expresión (4.3).

$$N_{pl} = A \cdot f_y \quad (4.3)$$

**Tabla 4.3: Resumen de los resultados de los ensayos en stub columns a compresión**

	$N_u$ [kN]	$N_{pl}$ [kN]	$N_u/N_{pl}$	$\delta_u$ [mm]
<b>S1-SC</b>	1194,6	943,0	1,27	2,6
<b>S2-SC</b>	672,5	494,5	1,36	3,5
<b>S3-SC</b>	547,0	553,2	0,99	2,8
<b>S4-SC</b>	438,0	593,7	0,74	2,9

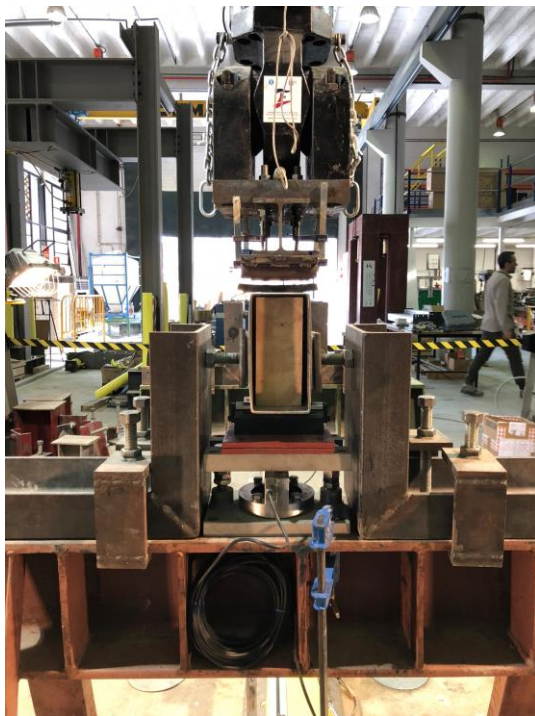
## 4.3 Vigas

### 4.3.1 Configuración del ensayo

En este apartado se explicará el proceso de los ensayos realizados con las cuatro vigas, en su eje fuerte, de sección rectangular hueca de acero inoxidable austenítico para conocer la resistencia a flexión pura de las diferentes secciones transversales y la capacidad de rotación.

Para la realización de los ensayos, se tuvo en cuenta la prevención de “web crippling”, que es una inestabilidad o fallo por abolladura que se produce en el alma o elemento vertical de la sección transversal bajo cargas concentradas, pudiendo aparecer en un apoyo a causa la reacción o bajo cargas externas aplicadas.

De esta manera para evitar este efecto se decidió colocar bloques de madera dentro de cada espécimen. Estos bloques de madera se colocaron en los puntos de apoyo de las vigas y en los puntos de aplicación de carga. En la Figura 4.13 a), se puede ver la colocación de un bloque de madera en una viga antes de ensayar y en la Figura 4.13 b) el resultado de la madera después de un ensayo.



*a) Bloque de madera antes del ensayo*



*b) Bloque de madera después del ensayo*

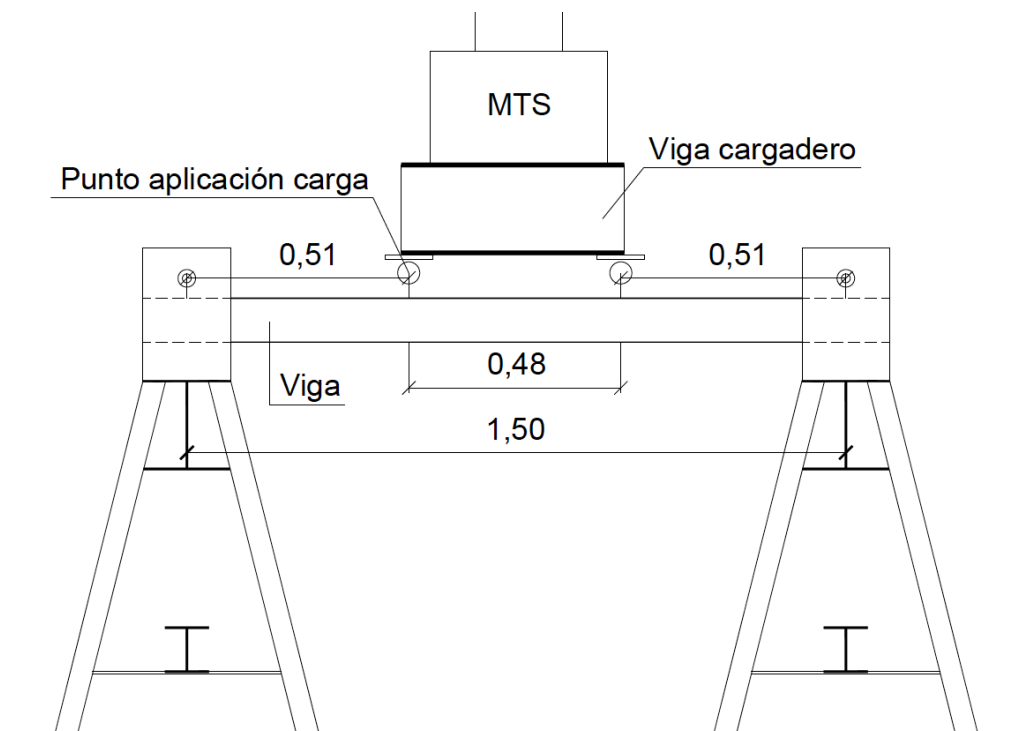
**Figura 4.13: Colocación bloques de madera**

Los ensayos se realizaron con vigas de longitud nominal de 1700 mm. Los ensayos se prepararon con una luz de viga de 1500 mm con dos voladizos a 100 mm sometidas a dos cargas puntuales a una distancia de un tercio aproximadamente, de manera que la zona entre puntos de carga está sometida sólo a momento flector.

La transmisión de las dos cargas puntuales a la viga se hace mediante una viga cargadero. Entre estas habrá una separación 480 mm, por lo que los puntos de aplicación de carga están situados a una distancia de 510 mm desde cada punto de apoyo como se puede observar en la Figura 4.14.

En la Figura 4.15 a) se muestra la colocación de la viga cargadero y de la viga para ensayar.

Cabe comentar que en la viga de sección S1-120x80x6 mm, se tuvo que realizar un cambio en la viga cargadero, ya que la que estaba colocada no era capaz de transmitir los esfuerzos a la viga a ensayar debido a su esbeltez como se muestra en la Figura 4.15 b), donde puede observarse el nuevo elemento que se empleó para la transmisión de cargas.



**Figura 4.14: Esquema acotado con la posición de los puntos de aplicación de la carga**





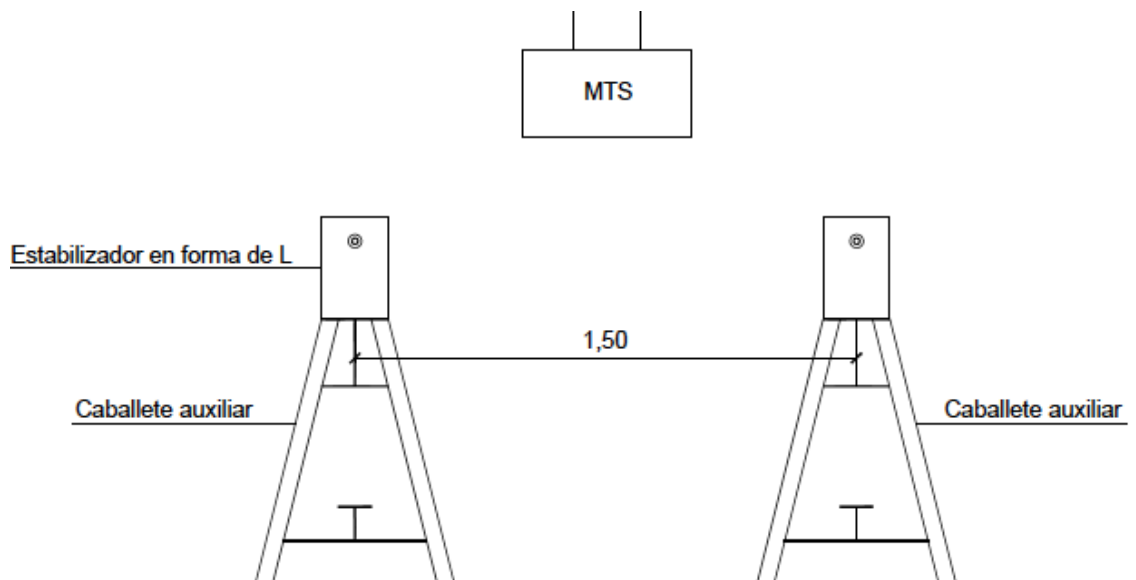
a) Viga cargadero para ensayos S2 y S4      b) Viga cargadero para ensayos S1 y S3

**Figura 4.15: Colocación viga cargadero pre-ensayos**

Los ensayos se llevaron a cabo en el actuador MTS hidráulico con una capacidad de hasta 1000 kN, realizando un control de desplazamiento en vez de carga para así poder observar el comportamiento de la viga tras alcanzar la carga máxima.

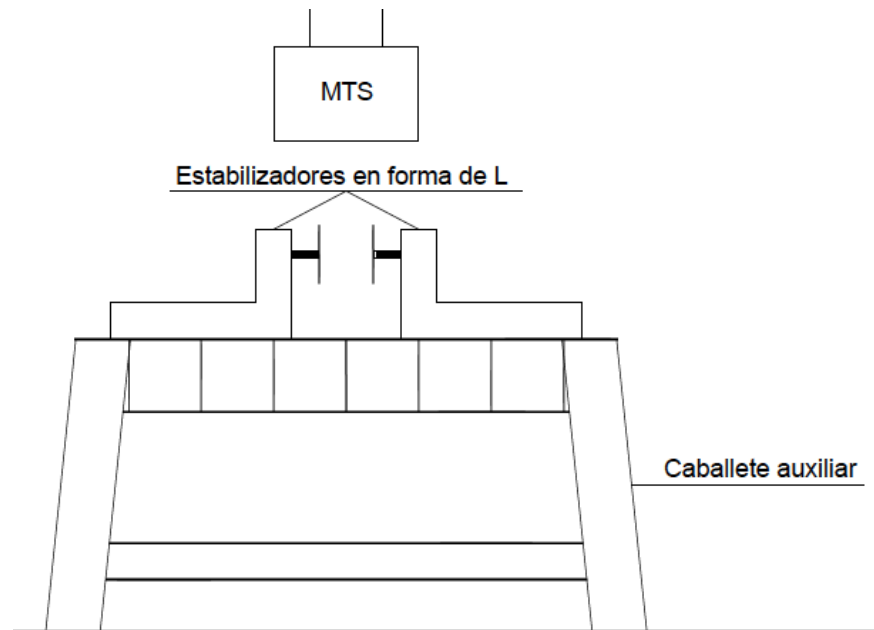
Para colocar la viga en una altura adecuada para la realización de los ensayos se decidió colocar dos caballetes como estructura auxiliar, separados desde el centro de cada uno de ellos 1,50 m. Encima de éstos se apoyaron las vigas. Para la sujeción lateral de la viga se colocaron dos estabilizadores con forma de L en cada caballete. Con el objetivo de sujetar la viga lateralmente y para que esta no actúe como si estuviera empotrada se decidió colocar teflón entre la superficie de la viga y de los estabilizadores, para así permitir movimiento vertical.

En la Figura 4.16 se muestra un esquema longitudinal de toda la estructura auxiliar que se montó para la ubicación de la viga y la Figura 4.17 un esquema transversal.



**Figura 4.16: Sección longitudinal de estructura auxiliar**





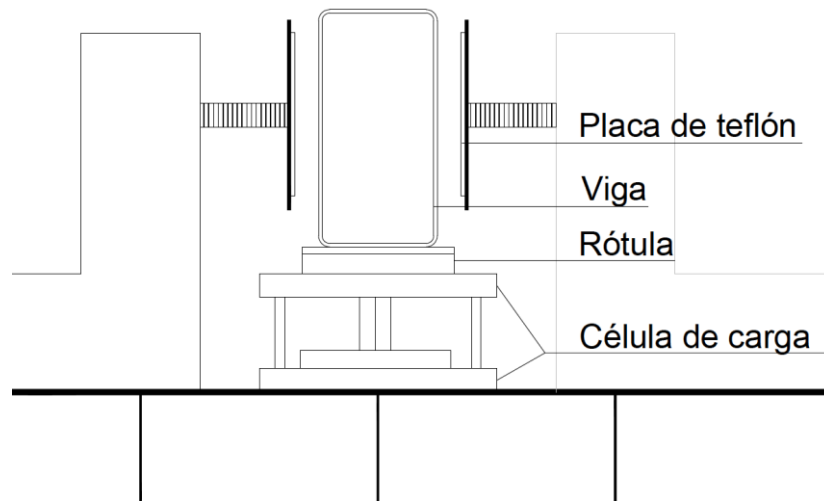
**Figura 4.17: Sección transversal de estructura auxiliar**

Se coloca una célula de carga en cada apoyo de la viga que será la encargada de transmitir al sistema de adquisición de datos, del cual se hablará posteriormente, el valor de las reacciones en cada momento del ensayo.

Para los ensayos se colocan dos piezas de neopreno en los puntos de aplicación de carga para evitar cargar acero contra acero.

Para conseguir que la viga sea simplemente apoyada en sus extremos, se decidió colocar unas rótulas encima de las células de carga, para asegurar que no se impedía el movimiento total en los apoyos, la rótula también sirve para dejar un espacio que permita deformarse la viga sin que haya contacto con la viga cargadero.

En la Figura 4.18, se muestra un esquema de todos los elementos que intervenían en el apoyo de la viga y la Figura 4.19 una imagen real de un ensayo.



**Figura 4.18:** Esquema elementos que forman el apoyo



**Figura 4.19:** Apoyo in situ en el laboratorio

Para realizar la monitorización del ensayo, además de los valores obtenidos de la célula de carga y del actuador MTS, se colocaron galgas extensométricas en la cara comprimida y traccionada de la viga, es decir, la cara superior e inferior respectivamente, para obtener el valor de las deformaciones de compresión y tracción que sufre cada cara de la viga al estar sometida a flexión. Las características de la galgas se pueden observar en la Tabla 4.2 y se colocaron en el centro de la cara.

Por otra parte para medir la flecha de los especímenes se colocaron tres transductores de desplazamiento, con el objetivo principal de realizar la medición de desplazamientos. Su funcionamiento se basa en la medición del hilo que lleva incorporado haciendo la diferencia entre la longitud inicial y la longitud final. La longitud máxima del hilo del transductor de desplazamiento es de 1000 mm.

Para la sujeción de los transductores de desplazamiento se utilizó un adhesivo llamado X60, a base de metacrilato, está formado por dos componentes, uno es un polvo que es mezclado con un líquido que se mezclan creando una pasta densa y homogénea y se aplica con fuerza sobre la superficie hasta que la pasta pasa a un estado rígido.

En un apoyo de la viga se colocó un inclinómetro para medir la rotación que sufre la viga al ser ensayada. A causa de disponer de un único inclinómetro, sólo pudo instrumentarse uno de los apoyos. No obstante y gracias a la simetría del problema estudiado y a la experiencia previa en ensayos similares de otros integrantes del grupo de estudio, se espera una rotación similar en los dos apoyos.

Además de los sensores mencionados anteriormente, se decidió colocar sensores de ultrasonido conectados a una placa de Arduino Due. En la Tabla 4.4 se muestran las características del sensor utilizado. La conexión del sensor se realizó como se puede observar en la Figura 4.20. El funcionamiento del sensor de ultrasonido se basa en la medición de tiempo que tarda entre el envío y la recepción de una onda de sonido.

El objetivo de la colocación de este sensor adicional fue realizar la conexión con el portal Camins Smartlab, que es un servicio de almacenaje de datos de ensayos experimentales en la nube de CaminsTECH. Así pues en la realización de cada ensayo se enviaban los datos obtenidos por el sensor de medición de distancia. En la Figura 4.21 se muestra el portal Camins Smartlab con los datos de cada uno de los ensayos medidos.

**Tabla 4.4: Características sensor ultrasonido**

	<b>Características</b>
<b>Modelo</b>	HC-SR04
<b>Rango [cm]</b>	2 - 400
<b>Resolución [cm]</b>	0,3
<b>Alimentación [V]</b>	5
<b>Corriente de alimentación [mA]</b>	15
<b>Dimensiones [mm]</b>	45x20x15

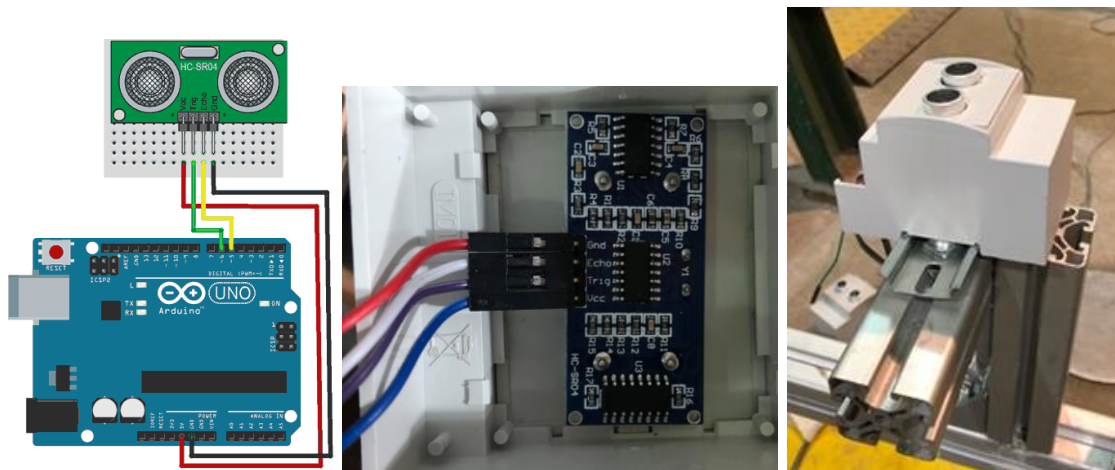


Figura 4.20: Conexión del sensor de ultrasonido e instrumentación en el laboratorio

Smartlab Logout(maria.domenica.torres)

Inicio / Experiments / PINOX

Device updated.

**Name**

**Participants**

**Devices**

Name
Device1
Viga-inox S4 200x100x3
Viga-inox S2 100x80x4
Viga-inox S1 120x80x6
Viga-inox S4 120x40x4

Figura 4.21: Portal Camins Smartlab

No se presentan datos de medición de este sensor debido a que era uno de los primeros ensayos realizados juntamente con el portal de Camins Smartlab, por lo que las mediciones registradas no fueron las correctas en todo momento por fallos recepción o envío de datos. Por otra parte cabe mencionar que la precisión del sensor de ultrasonido

para Arduino es deficiente para registrar durante 1 hora la flecha que se provocaba en las vigas.

Todos los sensores fueron montados en una estructura auxiliar sujeta en los caballetes como se puede observar en la Figura 4.22, donde se marca la posición de cada sensor.

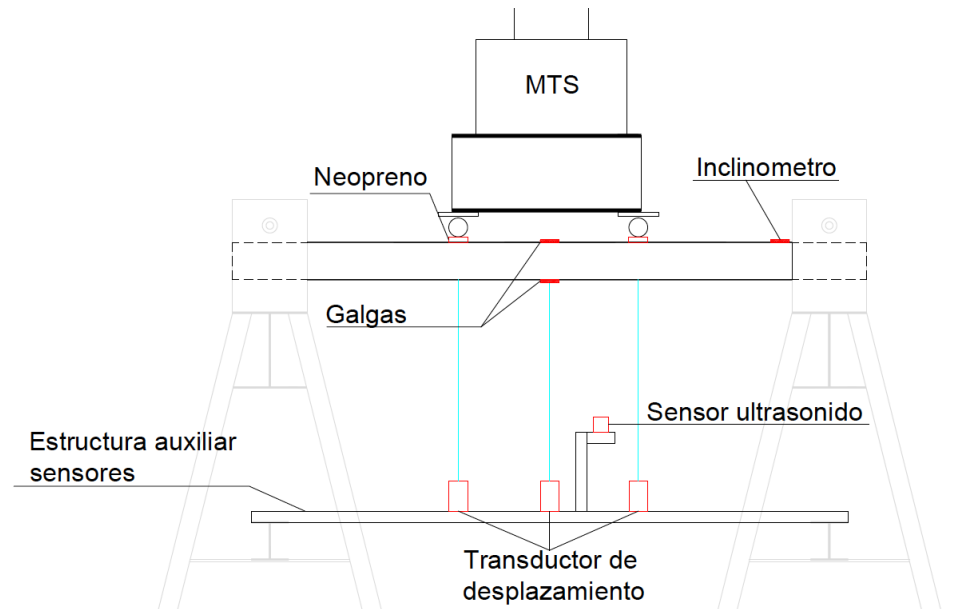


Figura 4.22: Esquema de colocación de sensores

En la Figura 4.23 se presenta todo el montaje final para empezar a realizar el ensayo de la viga S3.



Figura 4.23: Ensayo preparado para viga de sección S3

El sistema de adquisición de datos se realizó con el MGCPlus, el ensayo se realizó haciendo control de desplazamiento con una velocidad de ensayo que dependía de cada espécimen, de manera que la duración aproximada de cada uno de los ensayos fuera de una hora. En la Tabla 4.5 se muestran las velocidades de ensayo definidas para cada uno de los ensayos

**Tabla 4.5: Velocidad de ensayos a flexión en vigas**

	<b>Flecha según cálculos FE [mm]</b>	<b>Velocidad ensayo 1 [mm/min]</b>	<b>Velocidad ensayo 2 [mm/min]</b>
<b>S1-120x80x6</b>	200	1,3	4,5
<b>S2-100x80x4</b>	125	2,0	2,0
<b>S3-120x40x4</b>	250	2,0	4,5
<b>S4-200x100x3</b>	15	0,4	0,4

#### 4.3.2 Resultados de los ensayos

En este apartado se expondrán los resultados de los ensayos realizados en las vigas sometidas a flexión. En estos obtendremos la carga última  $F_u$  con su correspondiente flecha en el centro de la viga  $u_u$  y el momento flector último  $M_u$  calculado desde las reacciones de los apoyos, de la misma manera, también se presenta la comparación de la resistencia a flexión frente al momento flector elástico  $M_{el}$  y el plástico  $M_{pl}$ .

##### 4.3.2.1 Ensayo viga S1 - 120x80x6

El ensayo a flexión de la viga S1 se realizó el 15 de marzo de 2018. Durante el ensayo y al ser una viga muy robusta, se produjo el fallo de la viga cargadero y ésta empezó a deformarse como se puede ver en la Figura 4.24. Se tomó la decisión de parar el ensayo y realizar un cambio de la viga cargadero como se ha comentado con anterioridad. Una vez cambiada la viga cargadero se realizó nuevamente el ensayo el 19 de marzo de 2018.

El segundo ensayo se tuvo que parar en la rama de “endurecimiento por deformación o bajada” antes de los previsto ya que uno de los neoprenos se rompió y se decidió no seguir cargando acero contra acero.



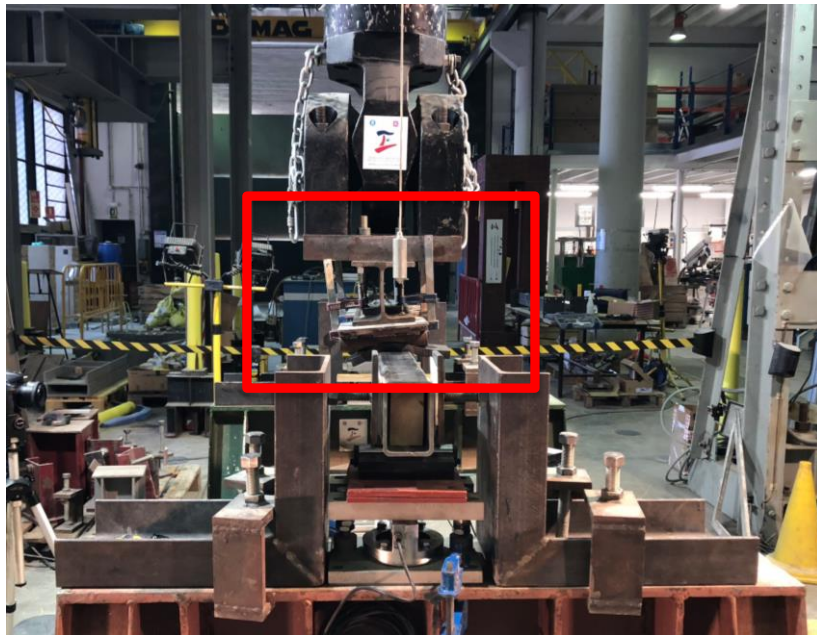


Figura 4.24: Fallo de la viga cargadero durante el ensayo de la viga S1

A continuación se muestran los resultados de los sensores utilizados para realizar el ensayo. En la Figura 4.25 se muestra la relación carga – rotación, mientras que en la Figura 4.26 se presenta la curva carga – desplazamiento en el centro de la viga y en la Figura 4.27 carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga.

Cabe comentar que en este ensayo la galgas extensométricas fallaron, por lo que no se dispone de la medición de las deformaciones en la cara comprimida y traccionada de la viga.

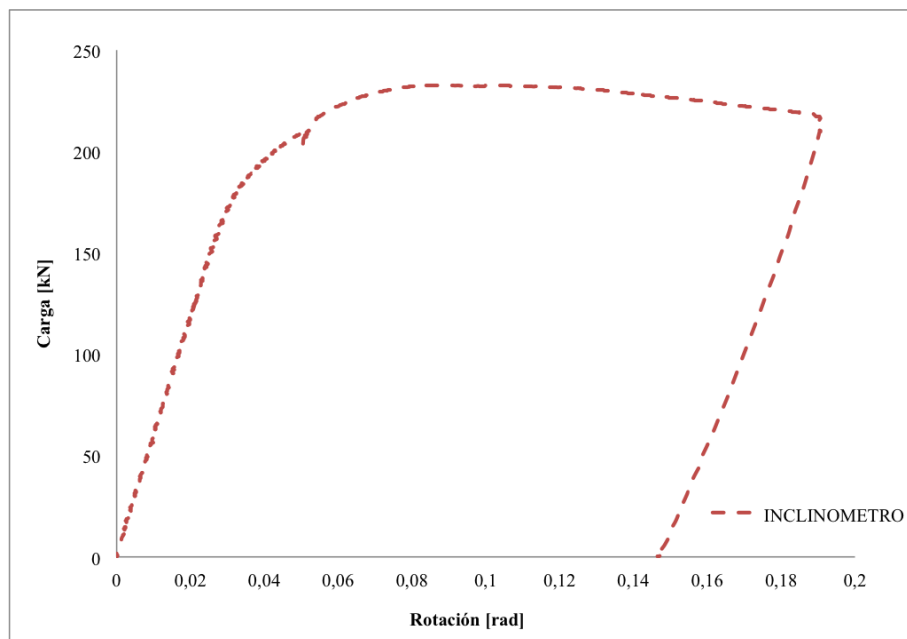
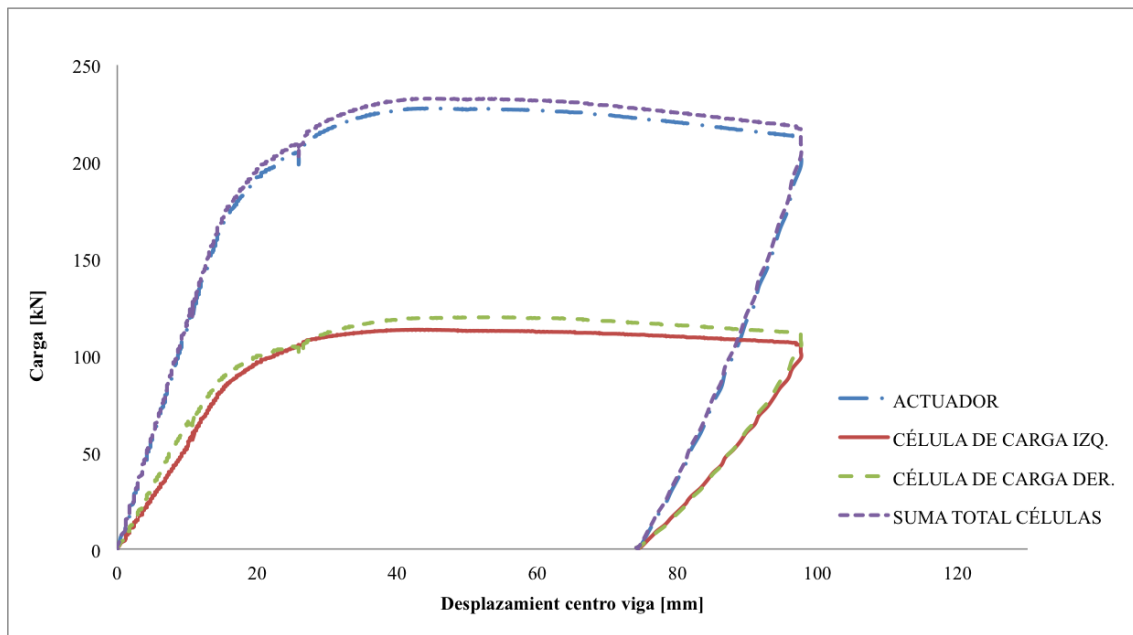
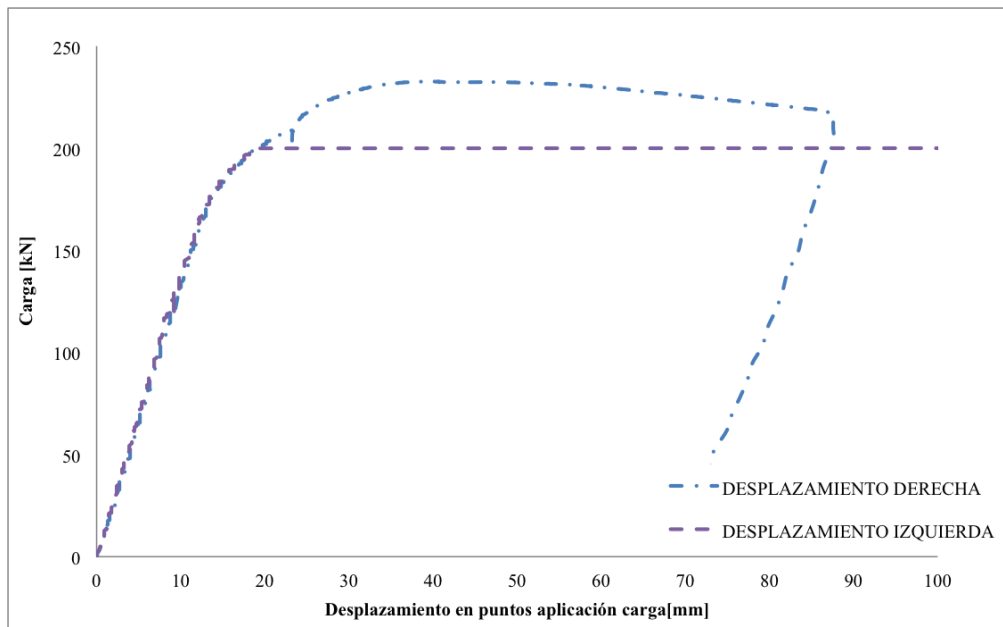


Figura 4.25: Curva carga – rotación de la viga S1



**Figura 4.26: Curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga S1**

En la Figura 4.26 se presenta las curvas carga – desplazamiento, como se puede observar las curvas que corresponden a las cargas de las células de carga son prácticamente iguales, lo cual es sinónimo de que el ensayo ocurrió simétrico. De la misma manera la suma de las dos células de carga es muy parecida a la carga del actuador MTS con lo que se puede verificar que los dos sistema funcionan correctamente.



**Figura 4.27: Curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S1**

Como se puede observar en la Figura 4.27 el transductor de desplazamiento de punto izquierdo de aplicación de carga falló durante el ensayo por lo que se deja de tener medición.



En la Tabla 4.6 se muestra el valor de la carga última con su correspondiente flecha y el momento flector último.

**Tabla 4.6: Valores numéricos finales ensayo viga S1**

	$F_u$ [kN]	$u_u$ [mm]	$M_u$ [kNm]
<b>Ensayo S1</b>	232,63	97,60	59,32

En la Figura 4.28 se muestran imágenes durante el ensayo de la viga S1, desde su preparación, inicio de carga, deformación y final.



*a) Colocación todos elementos antes de ensayar*



*b) Inicio del ensayo*



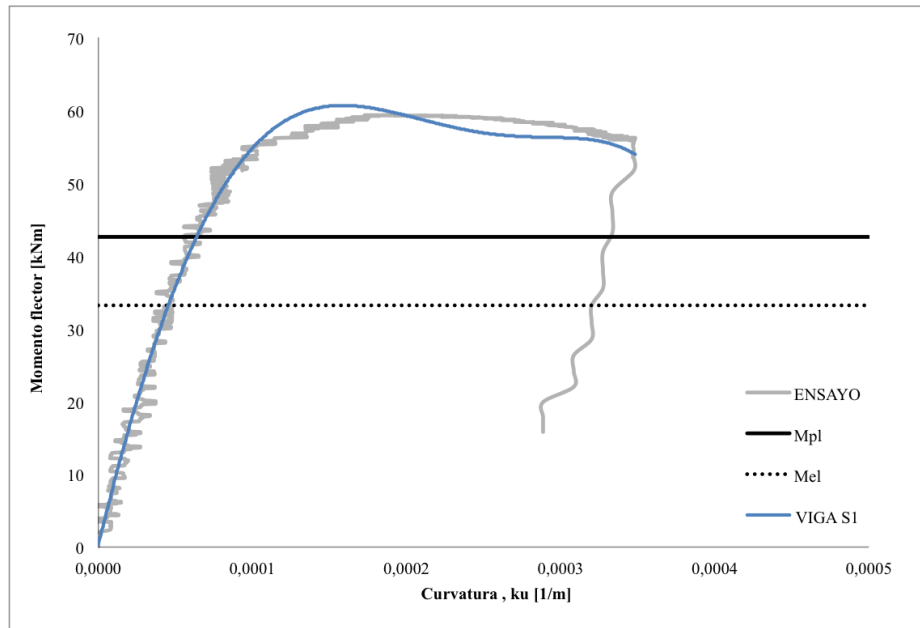
*c) Deformación máxima (antes de la descarga)*



*d) Finalización del ensayo*

**Figura 4.28: Preparación y realización del ensayo de la viga S1**

En la Figura 4.29 se representa la relación momento flector – curvatura y también se expone el límite de la capacidad plástica y elástica de la viga según lo expuesto en 4.3.2.



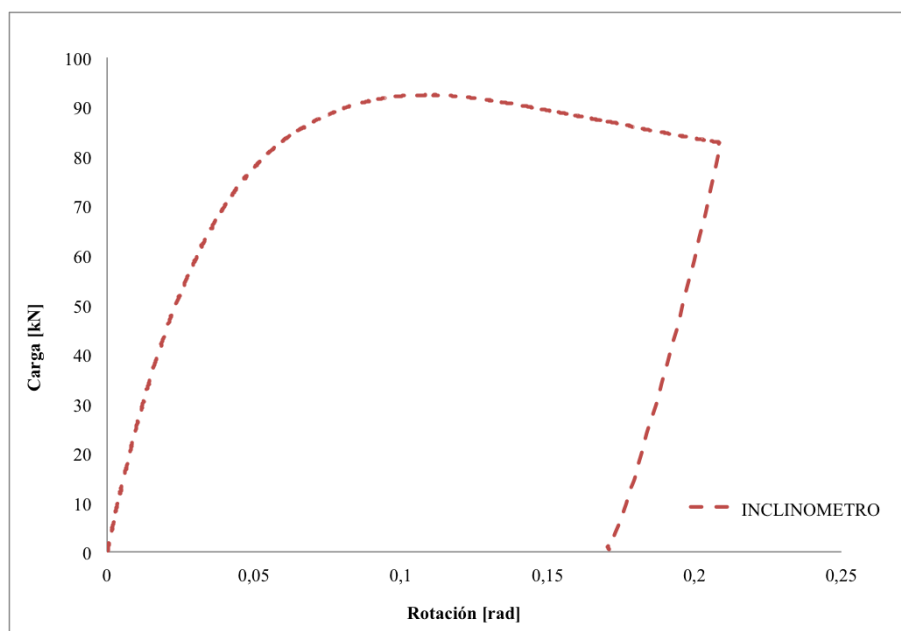
**Figura 4.29: Curva momento flector – curvatura última viga S1**

#### 4.3.2.2 Ensayo viga S2 - 100x80x4

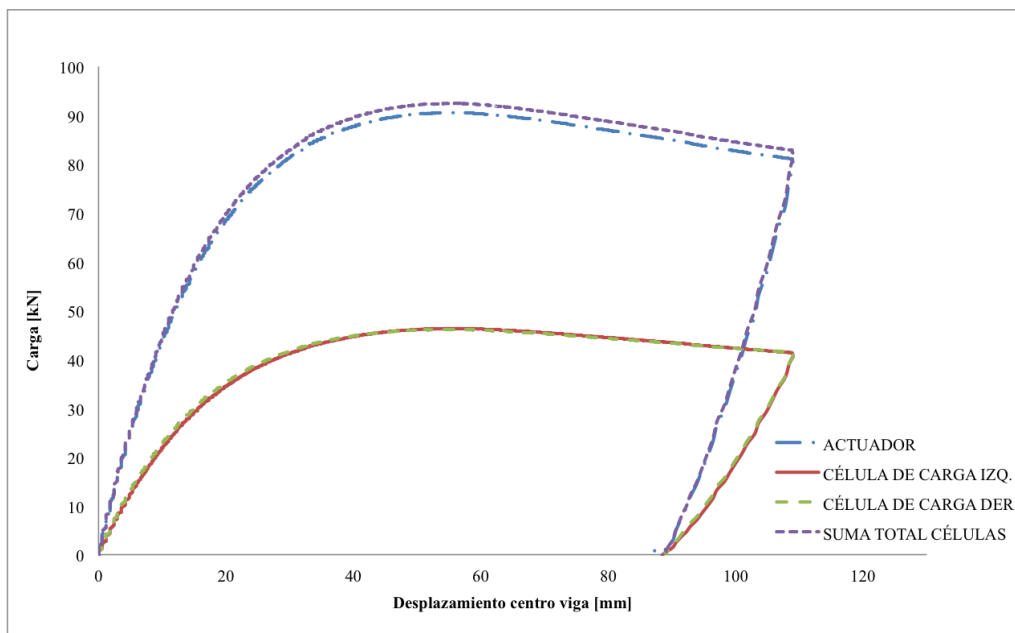
El ensayo a flexión de la viga S2 se realizó el 15 de marzo de 2018.

A continuación se muestran los resultados de los sensores utilizados para realizar el ensayo. En la Figura 4.30 se muestra la relación carga – rotación, mientras que en la Figura 4.31 se presenta la curva carga – desplazamiento en el centro de la viga y en la Figura 4.32 la curva carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga.

En este ensayo la galgas extensométricas también fallaron, por lo que no se dispone de la medición de las deformaciones en la cara comprimida y traccionada de la viga.

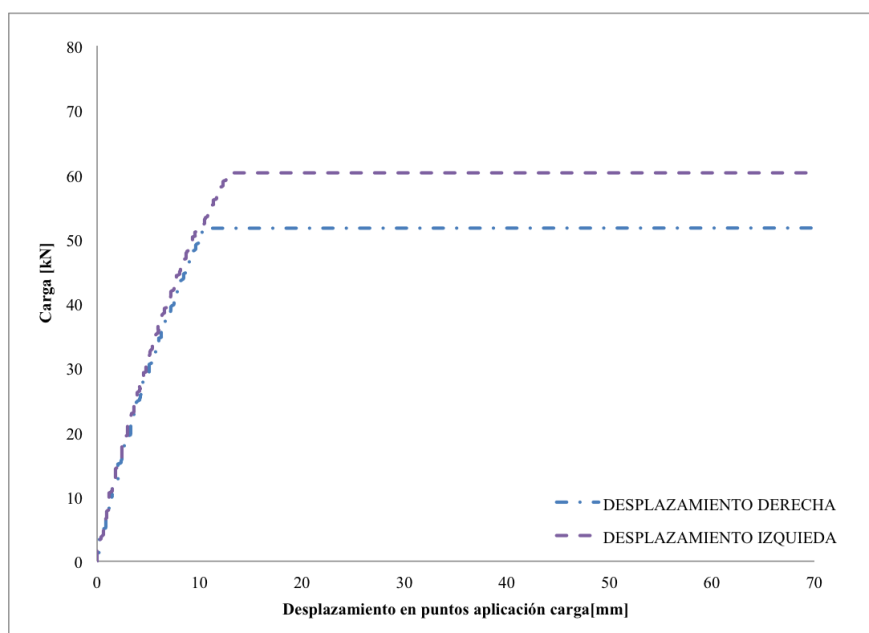


**Figura 4.30: Curva carga – rotación de la viga S2**



**Figura 4.31: Curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga S2**

Las curvas de la Figura 4.31 son análogas a las de la Figura 4.26. Se observa que el ensayo ocurrió de manera simétrica y que los dos sistemas de medición de carga funcionan correctamente.



**Figura 4.32: Curva carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S2**

Cabe mencionar que durante el ensayo los transductores de hilo colocados en el punto de aplicación de carga se despegan de la viga, por lo que se pierde la medición de los desplazamientos en ese momento como se observa en la Figura 4.32.

En la se Tabla 4.7 se muestra el valor de la carga última con su correspondiente flecha y el momento flector último.

Tabla 4.7: Valores numéricos finales ensayo viga S2

	$F_u$ [kN]	$u_u$ [mm]	$M_u$ [kNm]
Ensayo S2	92,43	55,37	23,56

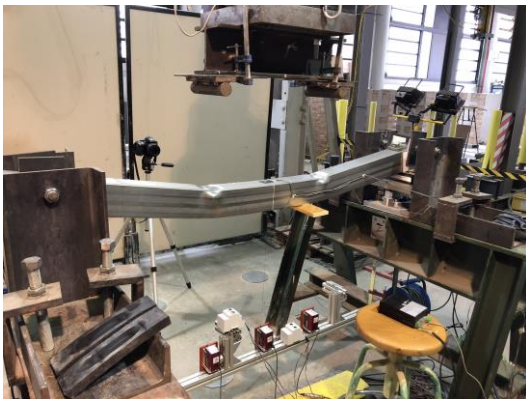
En la Figura 4.33 se muestran imágenes durante el ensayo de la viga S2, desde su preparación, inicio de carga, deformación y final.



a) Inicio del ensayo



b) Flecha máxima (antes de la descarga)



c) Finalización ensayo (subida pistón)



d) Vista desde parte trasera

Figura 4.33: Preparación y realización ensayo viga S2

En la Figura 4.34 se representa la relación momento flector – curvatura y también se expone el límite de la capacidad plástica y elástica de la viga según lo expuesto en 4.3.2.

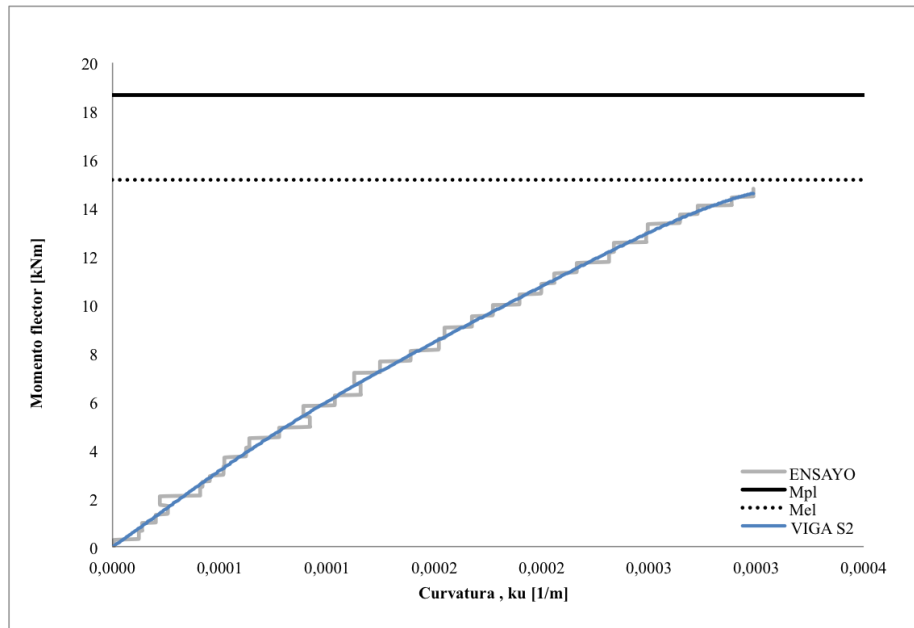


Figura 4.34: Curva momento flector – curvatura última de la viga S2

#### 4.3.2.3 Ensayo viga S3 - 120x40x4

El ensayo a flexión de la viga S3 se realizó el 20 de marzo de 2018.

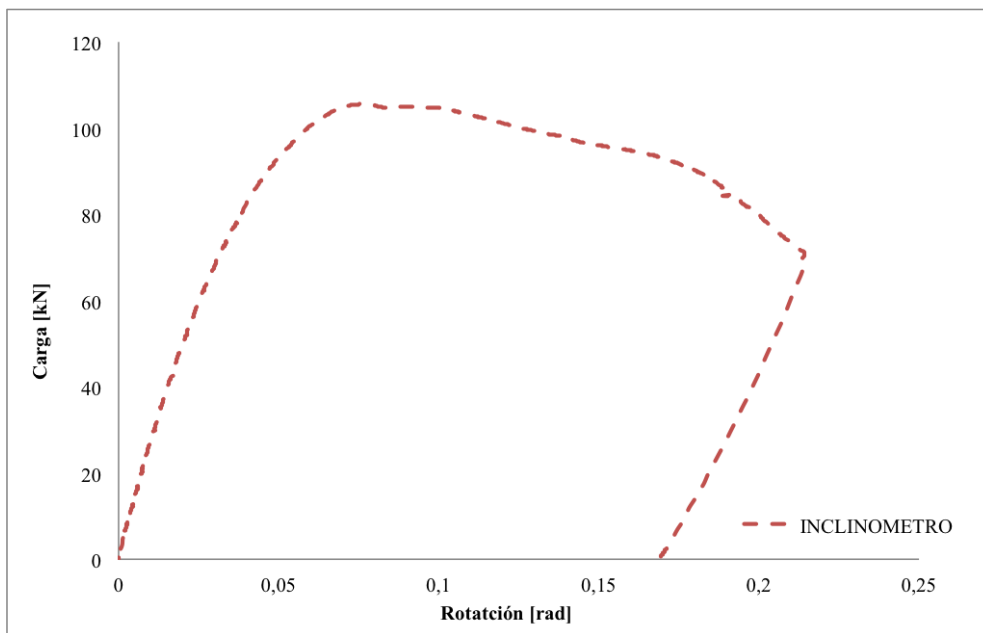
Como se puede observar en la Figura 4.35 la viga se deformó fuera del plano, por lo que como se puede observar en la Figura 4.37 se decidió parar el ensayo ya que el espécimen estaba demasiado deformado y no se quería aplicar una fuerza que provoque torsión o descentrada. Esto ocurrió una vez alcanzada la carga máxima en la rama de reblandecimiento y se debe a que la relación  $H/B$  es muy alta, lo que produce que cualquier excentricidad de la carga propicie desplazamientos fuera del plano.



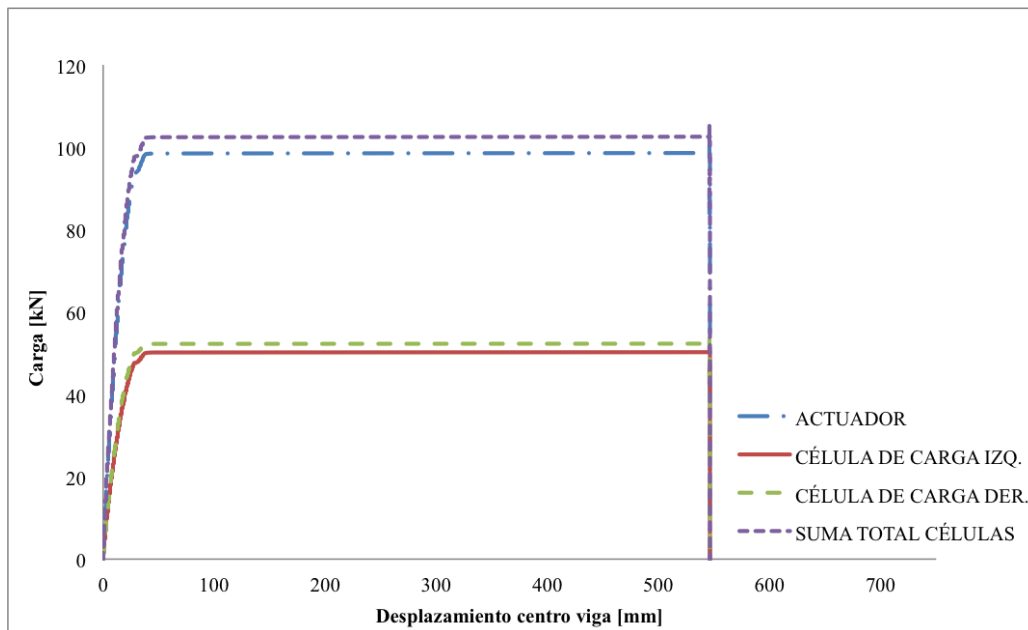
Figura 4.35: Deformación viga S3 fuera del plano



A continuación se muestran los resultados de los sensores utilizados para realizar el ensayo. En la Figura 4.36 se muestra la relación carga – rotación, mientras que en la Figura 4.37 las curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga, en la Figura 4.38 las curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga y en la Figura 4.39 se muestran los valores de las galgas extensométricas de la cara comprimida y la cara traccionada de la viga.

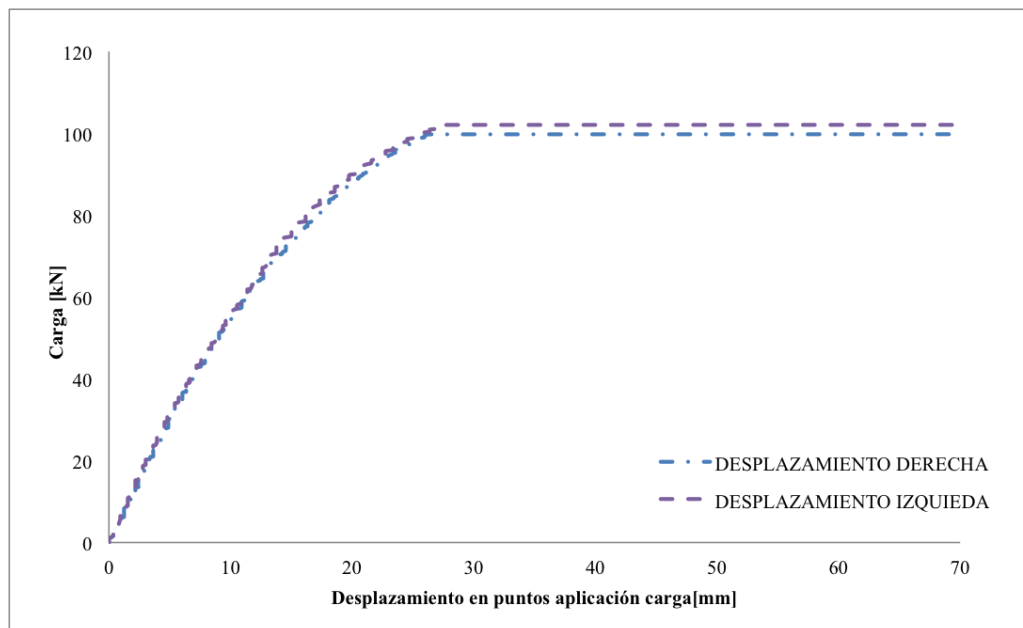


**Figura 4.36: Curva carga – rotación en la viga S3**



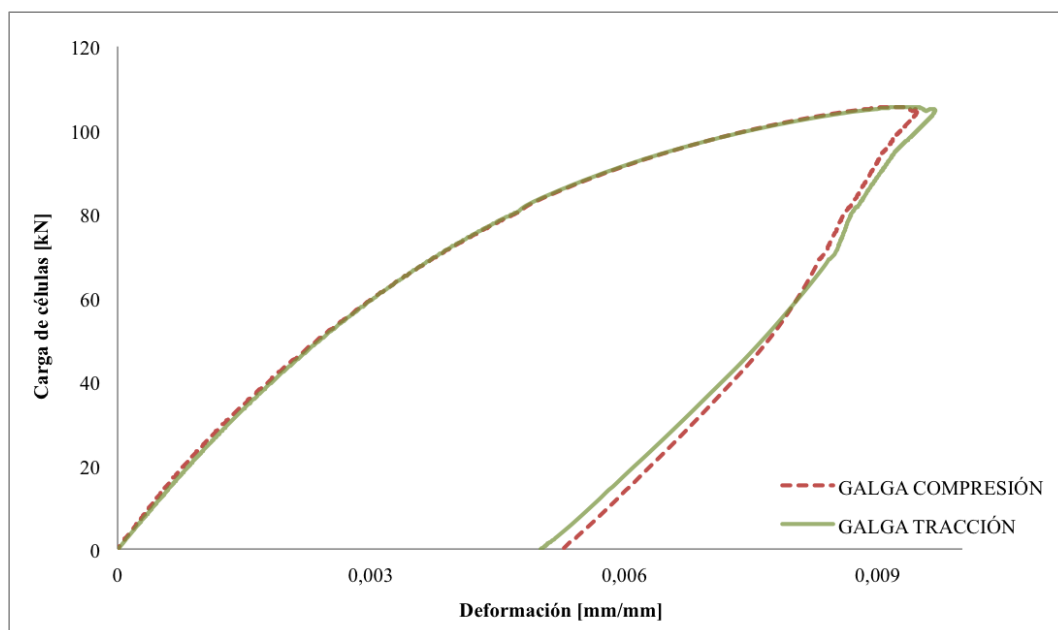
**Figura 4.37: Curvas carga –desplazamiento en el centro de la viga S3**

La Figura 4.37 es equivalente a la Figura 4.26 donde se observa que el ensayo ocurrió de manera simétrica, pero se puede observar que llegada la carga máxima se deja de tener lectura de las células de carga y del actuador MTS debido a que se paró el ensayo.



**Figura 4.38: Curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S3**

Durante el ensayo se despegaron de la superficie de la viga los tres transductores de desplazamiento debido a que la deformación en el punto de contacto con el adhesivo X60, mencionado anteriormente, fue excesiva para la rigidez del material. En la Figura 4.38 se observa que no hay mediciones de los transductores de desplazamiento a partir de cierto momento.



**Figura 4.39: Curvas carga – deformación viga S3**

En la Figura 4.39 se muestra el valor de la galga sometida a compresión en valor absoluto para realizar una comparación entre ellas. De tal manera que se puede observar que el valor de la deformación de la cara comprimida es igual al valor de la cara traccionada por lo que se demuestra que el comportamiento de la viga es simétrico durante todo el ensayo y que la aplicación de la carga produce una flexión pura en la sección transversal traccionando y comprimiendo igual las respectivas caras superior e inferior.

En la Tabla 4.8 se muestra el valor de la carga última con su correspondiente flecha y el momento flector último. No se tiene el valor último de la flecha en la carga máxima ya que los transductores de desplazamiento no funcionaron durante el ensayo completo.

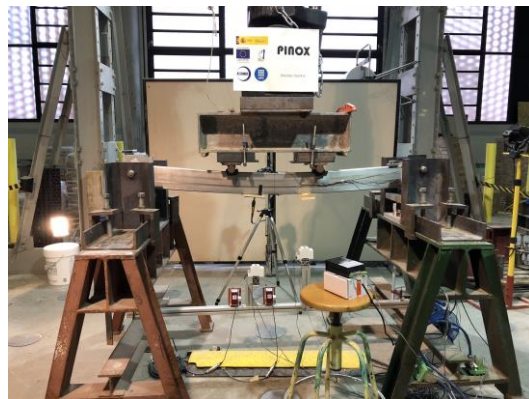
**Tabla 4.8: Valores numéricos finales ensayo viga S3**

	$F_u$ [kN]	$u_u$ [mm]	$M_u$ [kNm]
<b>Ensayo S3</b>	105,61	--	26,93

En la Figura 4.40 se muestran imágenes durante el ensayo de la viga S3, desde su preparación, inicio de carga, deformación y final.



*a) Inicio del ensayo*



*b) Durante el ensayo*



*a) Flecha máxima (antes de subir el actuador)*

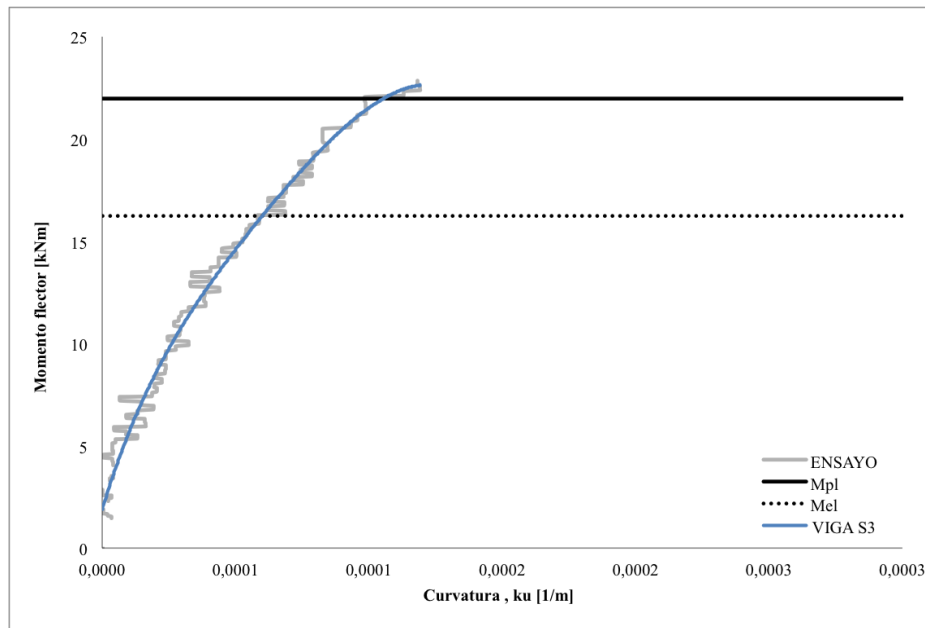


*b) Final ensayo*

**Figura 4.40: Preparación y realización ensayo viga S3**



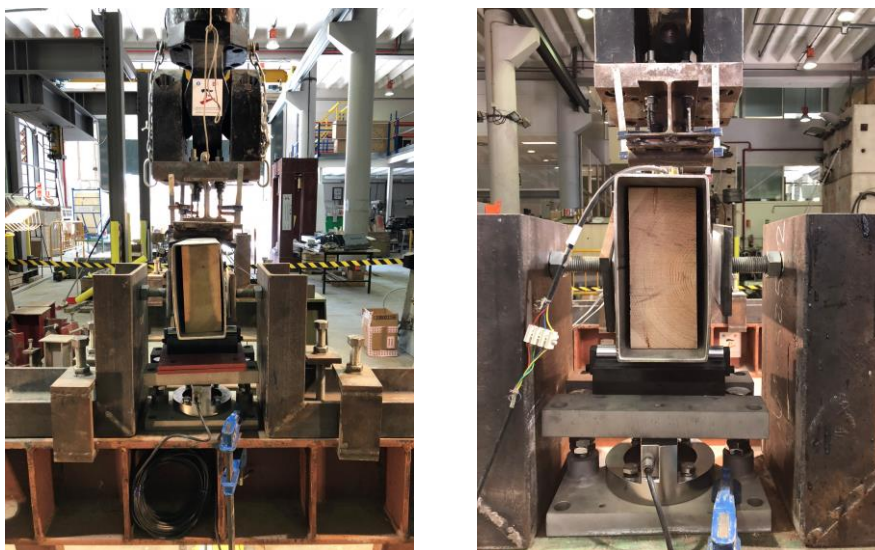
En la Figura 4.41 se representa la relación momento flector – curvatura y también se expone el límite de la capacidad plástica y elástica de la viga según lo expuesto en 4.3.2.



**Figura 4.41: Curva momento flector – curvatura última de la viga S3**

#### 4.3.2.4 Ensayo viga S4 – 200x100x3

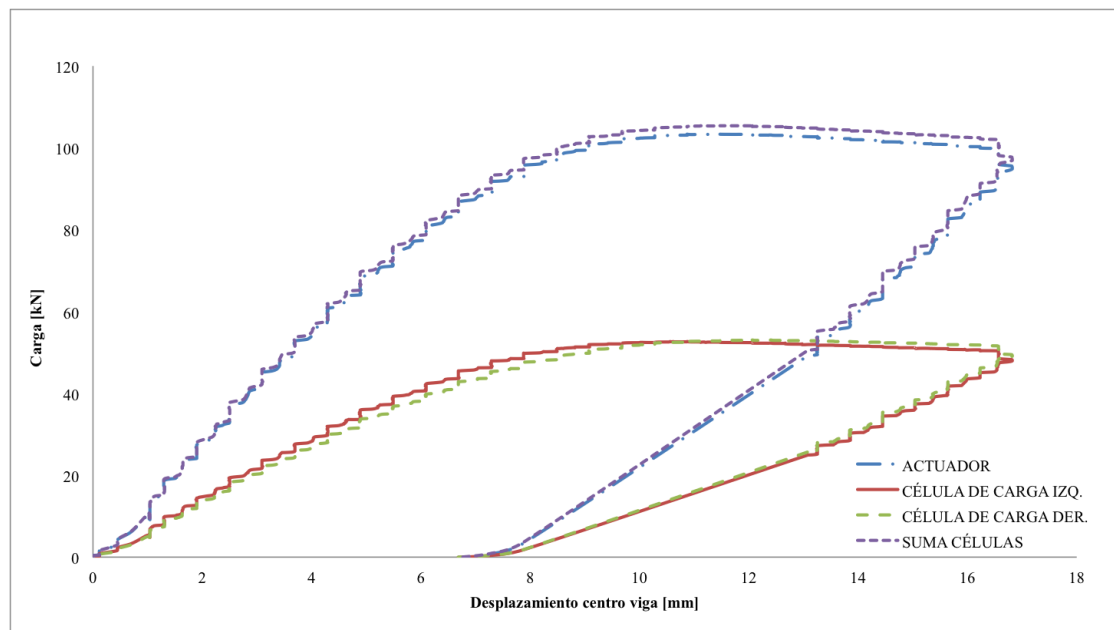
En ensayo a flexión de la viga S4 se realizó el 9 de marzo de 2018, pero al ser una sección muy resistente al realizar el ensayo la viga movió lateralmente los estabilizadores hacia atrás como se puede ver en la Figura 4.42, de manera que se detuvo el ensayo por seguridad, se aseguró correctamente los estabilizadores y se volvió a ensayar el 12 de marzo de 2018. El resultado del segundo ensayo a comparación con el primero es prácticamente igual pero sin movimiento transversal de los estabilizadores.



**Figura 4.42: Primer ensayo viga S4 – movimiento lateral de los estabilizadores**

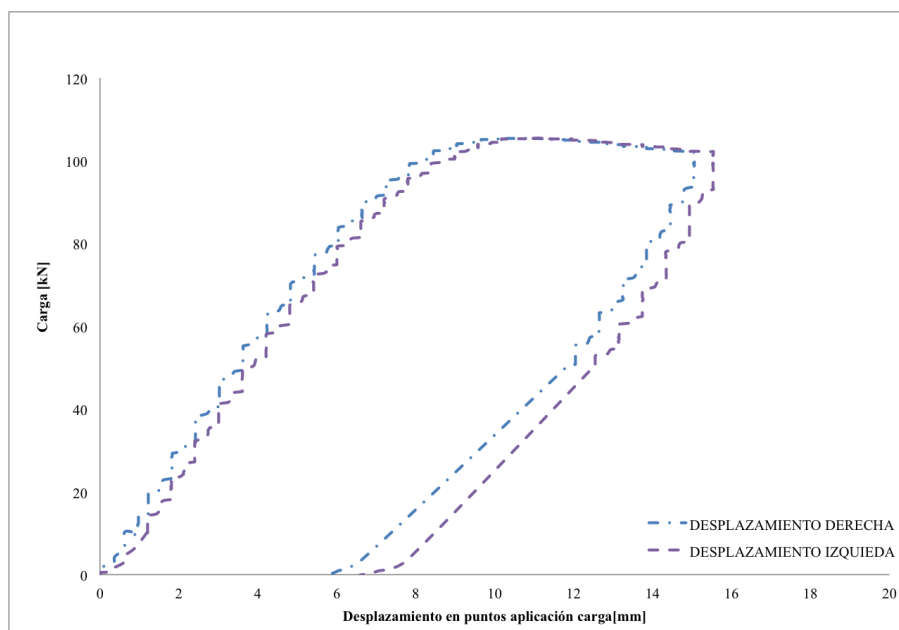
A continuación se muestran los resultados de los sensores utilizados para realizar el ensayo. En la Figura 4.43 se muestra la curva carga – desplazamiento en el centro de la viga y en la Figura 4.44 la curva carga – desplazamiento en los puntos de aplicación.

En este ensayo las galgas extensométricas también fallaron, por lo que no tenemos medición de la cara comprimida y traccionada de la viga y la medición del sensor de rotación tampoco es correcta.



**Figura 4.43: Curvas carga – desplazamiento en el centro de la viga S4**

La Figura 4.43 es equivalente a la Figura 4.43 donde se observa que el ensayo ocurrió de manera simétrica.



**Figura 4.44: Curvas carga – desplazamiento en los puntos de aplicación de carga de la viga S4**

En la se Tabla 4.9 muestra el valor de la carga última con su correspondiente flecha y el momento flector último.

Tabla 4.9: Valores numéricos finales ensayo viga S4

	$F_u$ [kN]	$u_u$ [mm]	$M_u$ [kNm]
<b>Ensayo S4</b>	105,41	11,47	26,88

En la Figura 4.45 se muestran imágenes durante el ensayo de la viga S4, desde su preparación, inicio de carga, deformación y final.



a) Colocación todos elementos antes de ensayar



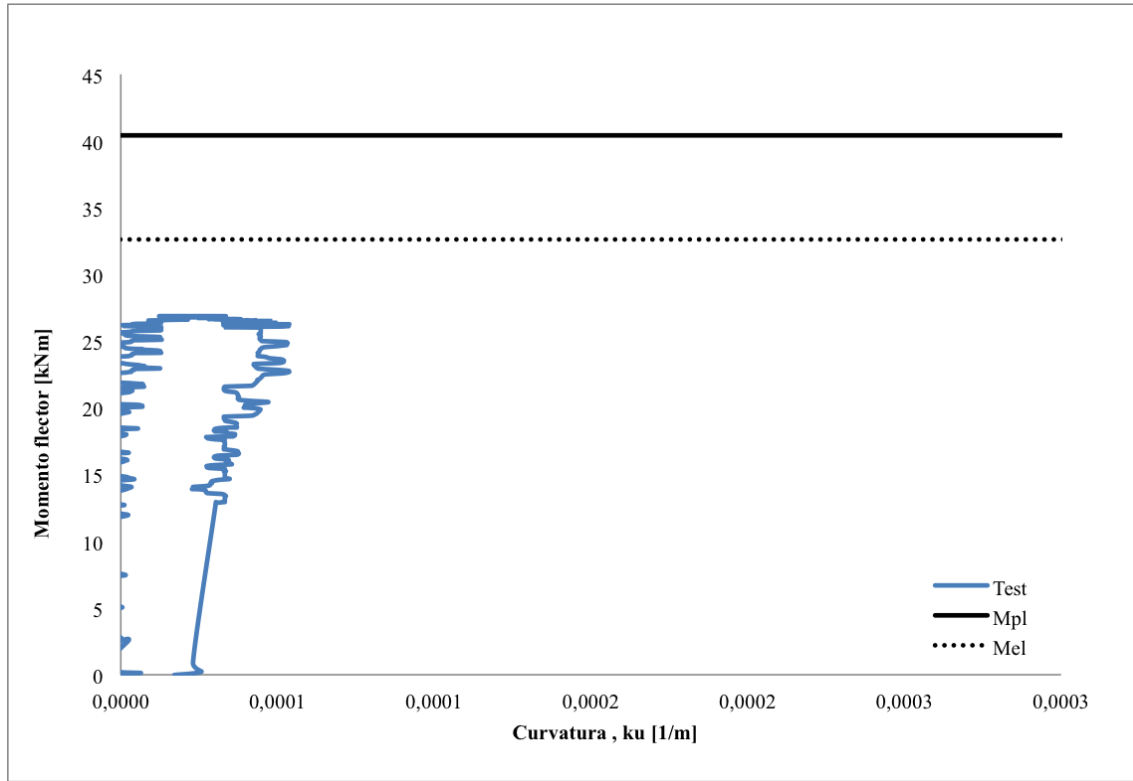
b) Inicio del ensayo



c) Resultado después de ensayar

Figura 4.45: Preparación y realización ensayo viga S4

En la Figura 4.46 se representa la relación momento flector – curvatura y también se expone el límite de la capacidad plástica y elástica de la viga según lo expuesto en 4.3.2.



**Figura 4.46: Gráfica momento flector – curvatura última viga S4**

Finalmente se expone la capacidad de rotación  $R$  para las vigas que presenten una relación  $M_u/M_{pl}$  mayor a 1. La capacidad de rotación es la medida de rotación entre el punto donde la curva momento-curvatura alcanza de nuevo la capacidad de flexión plástica  $M_{pl}$  en la rama creciente y el punto donde el momento está por debajo de  $M_{pl}$  en la rama descendente. La capacidad de rotación se determina según la expresión (4.3) y en Figura 4.47 la se muestra la curva que la representa. Y sus variables se expresan en las ecuaciones (4.4) y (4.5).

$$R = \frac{k_u}{k_{pl} - 1} \quad (4.3)$$

$$k_u = \frac{8 \cdot (u_2 - u_{av})}{4 \cdot (u_2 - u_{av})^2 + L^2} \quad (4.4)$$

$$k_{pl} = \frac{M_{pl}}{EI} \quad (4.5)$$

Donde:

- $k_u$  es la curvatura correspondiente a la carga última  
 $k_{pl}$  es la curvatura elástica correspondiente al momento plástico  
 $E$  es el módulo de Young  
 $I$  es la inercia de la sección transversal  
 $u_{av}$  es la media de la deformación producida en los puntos de aplicación de carga ( $u_1$  y  $u_3$ )  
 $L^*$  es la distancia entre puntos de aplicación de carga  
 $L$  es la luz de la viga

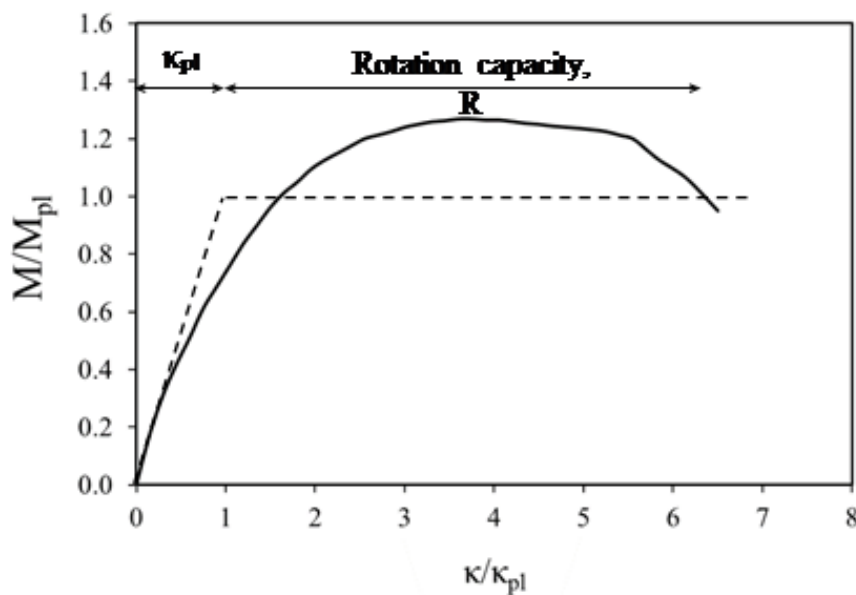


Figura 4.47: Curva para obtener la capacidad de rotación R.

En la Figura 4.48 se define todas las variables que intervienen en el cálculo de la capacidad de rotación.

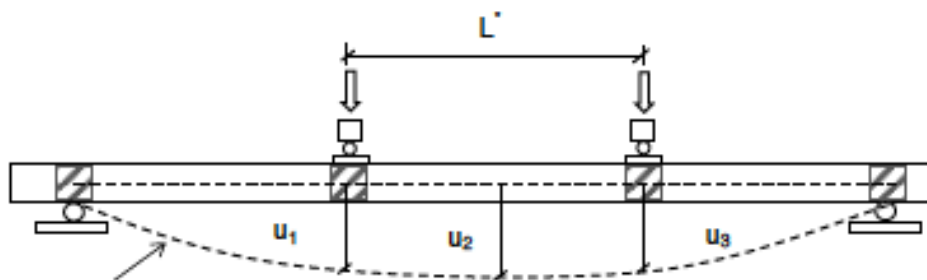


Figura 4.48: Definición de la simbología para determinar la curvatura en las vigas a flexión

Según lo expuesto en 4.3.2, se muestra a continuación la Figura 4.49 la curva normalizada de momento flector – curvatura para todas las vigas ensayadas. Las características de la sección bruta se muestran en la Tabla 4.10 y son los datos utilizados para el cálculo de  $M_{pl}$  y  $k_{pl}$ .

**Tabla 4.10: Propiedades mecánicas de la secciones de las vigas**

	<b>S1</b> <b>[120x80x6]</b>	<b>S2</b> <b>[100x80x4]</b>	<b>S3</b> <b>[120x40x4]</b>	<b>S4</b> <b>[200x100x3]</b>
<b>I</b> <b>[mm<sup>4</sup>]</b>	4381632	1994539	2013525	9472492
<b>E</b> <b>[MPa]</b>	198056	196138	198794	195228
<b>f<sub>y</sub></b> <b>[MPa]</b>	454,5	379,9	483,3	344,4
<b>W<sub>el</sub></b> <b>[mm<sup>3</sup>]</b>	73027	39891	33559	94725
<b>W<sub>pl</sub></b> <b>[mm<sup>3</sup>]</b>	93600	49120	45440	117300
<b>M<sub>el</sub></b> <b>[kNm]</b>	33,2	15,2	16,2	32,6
<b>M<sub>pl</sub></b> <b>[kNm]</b>	42,6	18,7	22,0	40,4
<b>k<sub>pl</sub></b> <b>[m<sup>-1</sup>]</b>	4,90E-05	4,77E-05	5,49E-05	2,918-05

Donde:

- I es la el momento de inercia alrededor del eje fuerte
- E es el módulo de Young
- f<sub>y</sub> es el límite elástico del acero
- W<sub>el</sub> es el momento resistente elástico de la sección alrededor del eje fuerte
- W<sub>pl</sub> es el momento resistente plástico de la sección alrededor del eje fuerte
- M<sub>el</sub> es el momento elástico de la sección
- M<sub>pl</sub> es el momento plástico de la sección

En la Tabla 4.11 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con los cuatro ensayos de vigas a flexión.

**Tabla 4.11: Resumen de los resultados de los ensayos en vigas a flexión**

	<b>F<sub>u</sub></b> <b>[kN]</b>	<b>u<sub>u</sub></b> <b>[mm]</b>	<b>M<sub>u</sub></b> <b>[kNm]</b>	<b>M<sub>u</sub>/M<sub>el</sub></b>	<b>M<sub>u</sub>/M<sub>pl</sub></b>	<b>R</b>
<b>Ensayo S1</b>	199,2	97,6	59,3	1,79	1,39	6,8
<b>Ensayo S2</b>	92,4	55,4	23,6	1,56	1,26	--
<b>Ensayo S3</b>	105,6	--	26,9	1,66	1,23	--
<b>Ensayo S4</b>	105,41	11,5	26,9	0,82	0,66	--



En la Tabla 4.11 se presentan los resultados de cada espécimen en relación a su capacidad plástica y elástica. La viga S1 supera su capacidad plástica con una capacidad de rotación  $R > 3$ , por lo tanto es clasificada como Clase 1. La viga S2 y S3 tienen un ratio de  $M_u/M_{pl}$  mayor a 1, pero según dos datos obtenidos de la campaña experimental no se llega a conocer la capacidad de rotación de estos dos especímenes por lo tanto se consideran Clase 2.

Las curva normalizadas de momento flector – curvatura se presentan en la Figura 4.49 para las cuatro vigas biapoyadas sometidas a flexión pura. No se presenta la curva de la viga S4, ya que al ser Clase 4, por tener un ratio de  $M_u/M_{pl}$  muy bajo, la adquisición de datos que son necesarios para la realización de los cálculos de curvatura son imposibles, aunque en el ensayo se llegaron a las cargas últimas.

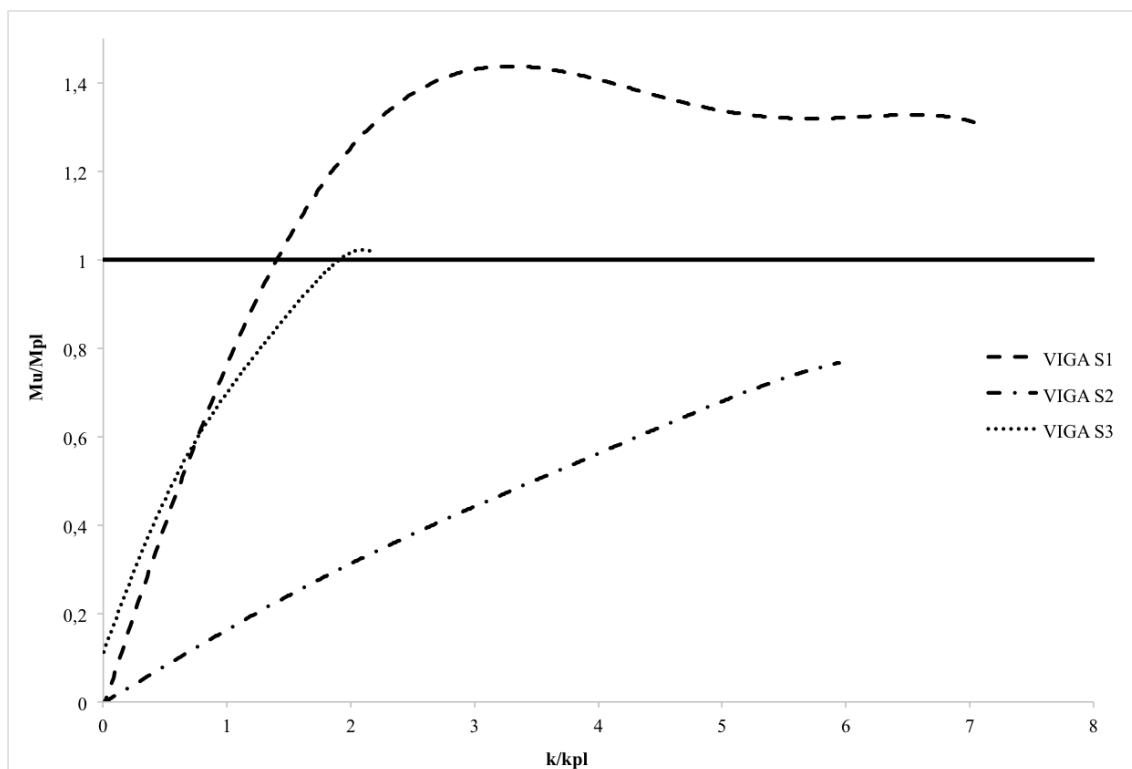


Figura 4.49: Curvas normalizadas momento flector - curvatura

En la Figura 4.50 se muestran los cuatro especímenes ya ensayados como resultado final.



**Figura 4.50: Resultado final de las cuatro vigas ensayadas a flexión**



## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Introducción

En este capítulo se realizará un análisis de los resultados obtenidos en la campaña experimental, tanto para los stub columns sometidos a compresión como de las vigas sometidas a flexión.

Primeramente se realizará la evaluación de los límites para la clasificación de secciones en la norma europea EN 1993-1-4:2006 [15]. Hay que tener presente que las expresiones que se encuentran en esta norma y en la norma australiana no tienen en cuenta el efecto de endurecimiento por deformación que sufre el acero inoxidable y por lo tanto son muy conservativas. Así pues, se estudian métodos alternativos como el Continuous Strength Method (CSM), el cual tiene expresiones más precisas para secciones robustas y Direct Strength Method (DSM) basado en una única curva de resistencia para secciones huecas rectangulares de acero inoxidable sometidas a compresión y flexión. Estos dos métodos tienen en cuenta el endurecimiento por deformación y los efectos de abolladura local tanto para sección robustas como para esbeltas.

### 5.2 Cálculos previos de las características del material

El diferente comportamiento de la región plana y de la esquina de la sección transversal se tendrán en cuenta en el análisis de los resultados de los ensayos experimentales determinando las propiedades ponderadas del material de acuerdo al área de la región plana y el área de la región de la esquina comparadas con el área total de la sección transversal y según los valores de Tabla 3.7. El área de la región plana y de la esquina comprende una región como la que se muestra en la Figura 5.1, en la que el área de la región de la esquina está formada por el radio y una parte de la zona plana de longitud dos veces el espesor hacia cada lado y la región plana el resto de la zona plana.

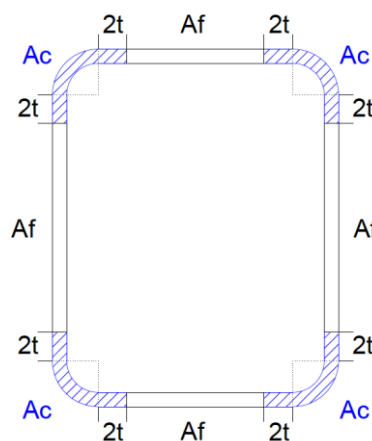


Figura 5.1: Región plana y esquina de la sección transversal

En la Tabla 5.1 se muestran las propiedades ponderadas del material de cada sección.

**Tabla 5.1: Propiedades ponderadas del material**

	Área [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>corner</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>flat</sub> [mm <sup>2</sup> ]	E [MPa]	σ <sub>0,2</sub> [MPa]	σ <sub>u</sub> [MPa]
<b>S1</b> [120x80x6]	2074,7	1239,5	835,2	198056	454,5	768,7
<b>S2</b> [100x80x4]	1301,8	399,4	902,4	196138	379,9	714,4
<b>S3</b> [120x40x4]	1144,6	811,8	332,8	198794	483,3	789,6
<b>S4</b> [200x100x3]	1723,8	291,0	1432,8	195228	344,4	688,6

Las propiedades del material se obtienen según el estudio de Gardner y Nethercot [31] como se ha comentado con anterioridad, por lo que los valores de la Tabla 5.1 provienen de la ponderación con los valores de la Tabla 3.7. Para realizar un cálculo exacto se debería disponer de los datos de ensayos a nivel de material de probetas de la zona plana y de la esquina, pero no se han podido obtener antes de la realización de los ensayos a nivel de sección.

Por otro lado no se consideran las propiedades del material que los Mill Certificate proporcionan, ya que corresponden a las chapas antes de su conformación en secciones, por lo tanto su utilización para el análisis de los resultados no es la idónea ya que al conformar la sección se produce endurecimiento y la resistencia aumenta.

### 5.3 Evaluación de los límites de clasificación de sección

Para la clasificación de secciones se debe tener en cuenta las propiedades geométricas de la sección transversal, ya que según EN 1993-1-4:2006 [15] los límites de esbeltez irán en función de  $c/\epsilon t$  de los elementos comprimidos, evaluando el elemento más esbelto de la sección transversal, donde  $c$  corresponde al ancho del elemento plano ( $H - 2t$  o  $B - 2t$ ), siendo  $H$  la altura,  $B$  el ancho,  $t$  el espesor del elemento y  $\epsilon$  considera las propiedades del material, que se define en la ecuación (5.1). Según el Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural [2] se utiliza valores menos conservadores para el cálculo de  $c$ , que corresponden a ( $H - 3t$  o  $B - 3t$ ).

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} \quad (5.1)$$

Donde:

$f_y$  es el límite elástico también considerado  $\sigma_{0,2}$   
E es el módulo de Young

En la Tabla 5.2 se presenta el resumen de los límites para la clasificación de elementos internos sometidos a compresión y a flexión.

**Tabla 5.2: Relación ancho-espesor máxima de elementos internos comprimidos**

	Elementos internos a compresión	Elementos internos a flexión
<b>Clase 1</b>	$c/t \leq 33,0\varepsilon$	$c/t \leq 72,0\varepsilon$
<b>Clase 2</b>	$c/t \leq 35,0\varepsilon$	$c/t \leq 76,0\varepsilon$
<b>Clase 3</b>	$c/t \leq 37,0\varepsilon$	$c/t \leq 90,0\varepsilon$

Una sección se clasificará como Clase 4 siempre y cuando supere el límite de Clase 3.

La clasificación de los stub columns sometidos a compresión se presenta a continuación, donde se evaluará el elemento interno más limitante, que corresponde al más esbelto. Se evaluará según lo codificado en EN 1993-1-4:2006 [15] en la Tabla 5.3 y en el Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2] en la Tabla 5.4.

**Tabla 5.3: Clasificación de las secciones transversales de los stub columns sometidas a compresión según EN 1993-1-4:2006 [15]**

	c/t	$\varepsilon$	Límites de clasificación			Clase de sección	$N_u/N_{pl}$
			33 $\varepsilon$	35 $\varepsilon$	37 $\varepsilon$		
<b>SC - S1</b>	18	0,636	23,04	24,44	25,84	Clase 1	1,27
<b>SC - S2</b>	23	0,667	25,08	26,61	28,12	Clase 1	1,36
<b>SC - S3</b>	28	0,625	22,40	23,74	25,10	Clase 4	0,99
<b>SC - S4</b>	64,7	0,684	26,28	27,87	29,47	Clase 4	0,74

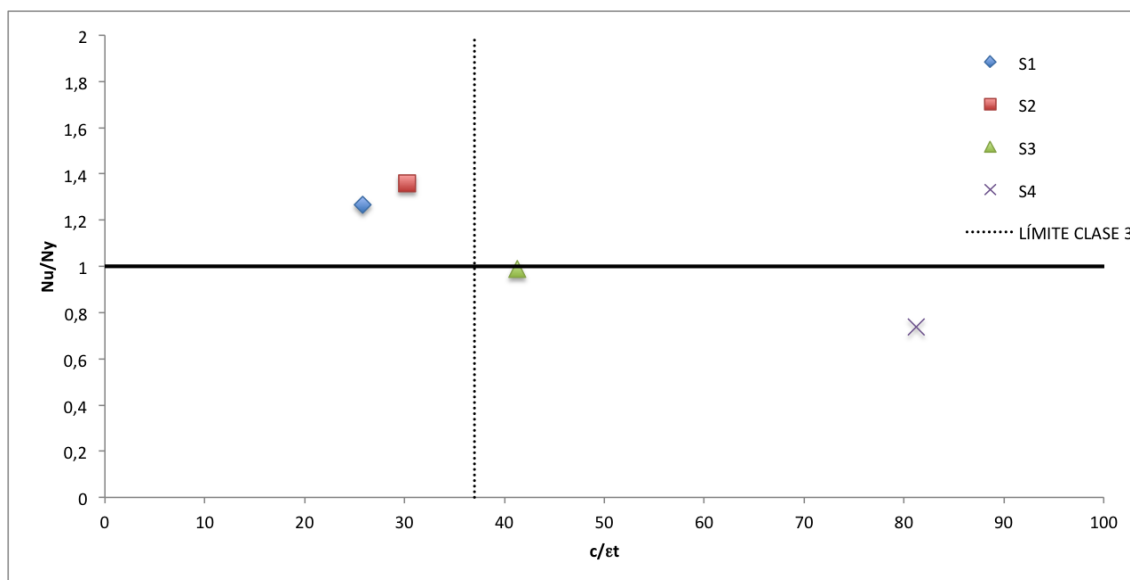
**Tabla 5.4: Clasificación de las secciones transversales de los stub columns sometidas a compresión según Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2]**

	c/t	$\varepsilon$	Límites de clasificación			Clase de sección	$N_u/N_{pl}$
			33 $\varepsilon$	35 $\varepsilon$	37 $\varepsilon$		
<b>SC - S1</b>	17	0,636	23,04	24,44	25,84	Clase 1	1,27
<b>SC - S2</b>	22	0,667	25,08	26,61	28,12	Clase 1	1,36
<b>SC - S3</b>	27	0,625	22,40	23,74	25,10	Clase 4	0,99
<b>SC - S4</b>	63,7	0,684	26,28	27,87	29,47	Clase 4	0,74

Como se puede observar el ratio de  $c/t$  es menos conservador en el Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2] pero aun así el ratio no varía significativamente para que ninguna sección cambie su clasificación.

De esta manera se realizará un análisis plástico para la sección S1 y S2 y se deberá aplicar el factor de reducción  $\rho$  según la ecuación (2.1) para encontrar el área eficaz para las secciones S3 y S4.

En la Figura 5.2 se presenta los resultados correspondientes a los ensayos de stub columns sometidos a compresión según su relación  $N_u/N_y$  que se encuentran en la Tabla 4.3, siendo  $N_u$  el axil obtenido de los ensayos y el límite de Clase 3 según EN 1993-1-4:2006 [15] y el Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2].



**Figura 5.2: Clasificación sección transversal stub columns sometidos a compresión**

Todos las secciones con ratios de  $N_u/N_y$  por encima de 1 se consideran totalmente eficaces y por lo tanto fuera del límite de Clase 3 – 4 ya que el axil de ensayo es superior al axil plástico. Sin embargo los ratio de  $N_u/N_y$  inferiores a 1 están dentro del rango entre Clase 3 y 4, por lo que no toda la sección de los especímenes se considerará eficaz y por lo tanto deberá aplicarse el factor de reducción según lo expuesto en el apartado 2.5.1.

En la Tabla 5.5 y en la Tabla 5.6 se presenta la clasificación de las vigas sometidas a flexión, cabe mencionar que los elementos que forman la altura de la sección  $H$ , están sometidos a flexión, mientras que el ancho  $B$ , superior está sometido a compresión y el inferior a tracción. De esta manera se evaluarán los dos casos.

**Tabla 5.5: Clasificación de los elementos que forman el ancho de las vigas sometidos a compresión**

	c/t	$\epsilon$	Límites de clasificación			Clase de sección	$M_u/M_{el}$	$M_u/M_{pl}$
			33 $\epsilon$	35 $\epsilon$	37 $\epsilon$			
<b>S1</b>	11,3	0,636	23,04	24,44	25,84	Clase 1	1,79	1,39
<b>S2</b>	18	0,667	25,08	26,61	28,12	Clase 1	1,56	1,26
<b>S3</b>	8	0,625	22,40	23,74	25,10	Clase 1	1,66	1,23
<b>S4</b>	31,3	0,684	26,28	27,87	29,47	Clase 4	0,82	0,66

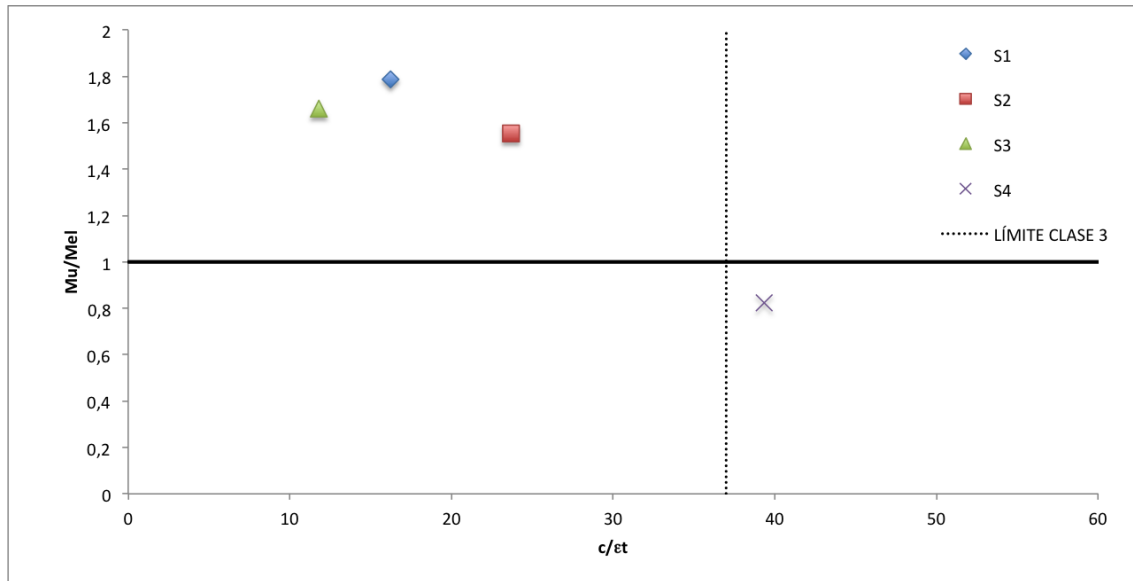
**Tabla 5.6: Clasificación de los elementos que forman la altura de las vigas sometidas a flexión**

	c/t	$\epsilon$	Límites de clasificación			Clase de sección	$M_u/M_{el}$	$M_u/M_{pl}$
			72 $\epsilon$	76 $\epsilon$	90 $\epsilon$			
<b>S1</b>	18	0,636	50,28	53,07	62,85	Clase 1	1,79	1,39
<b>S2</b>	23	0,667	54,73	57,78	68,41	Clase 1	1,56	1,26
<b>S3</b>	28	0,625	48,85	51,56	61,06	Clase 1	1,66	1,23
<b>S4</b>	64,7	0,684	57,34	60,53	71,68	Clase 3	0,82	0,66

No se expone el cálculo mediante el Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2] ya que al las vigas S1, S2 y S3 son Clase 1, por lo que no puede ser menos conservador y de la misma manera la viga S4 tiene un ratio de c/t de 63,7 por lo que sigue siendo Clase 3 según este Manual.

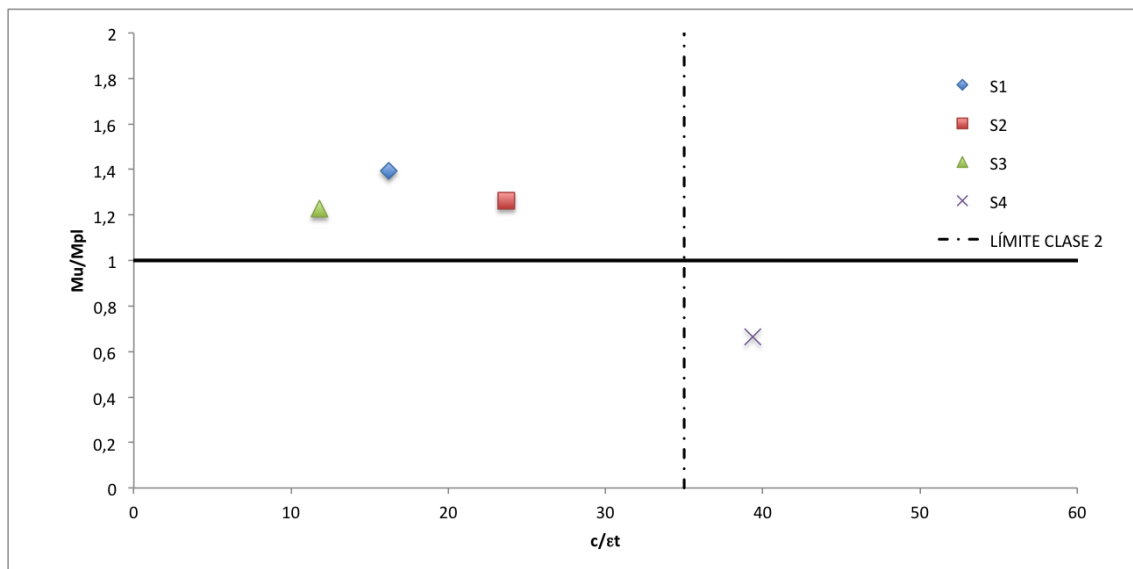
En la Figura 5.3 se presenta la evaluación de Clase 3 de los resultados de los ensayos de vigas sometidas a flexión según su relación  $M_u/M_{el}$  y en la Figura 5.4 la evaluación de límite de Clase 2 según la relación  $M_u/M_{pl}$ . Los valores del momento flector último y la capacidad elástica y plástica de la sección se encuentran en la Tabla 4.11. Siendo  $M_u$  el momento flector obtenido de los ensayos.

En el caso de las vigas sometidas a flexión es más limitante la Clase de la base de la sección transversal a compresión que la altura de la sección transversal a flexión, por lo que en las Figura 5.3 y Figura 5.4 se expresa según los límites a compresión.



**Figura 5.3: Límite Clase 3 para los elementos en compresión en las vigas simplemente apoyadas**

En la Figura 5.3 se observa que cuándo el ratio  $M_u/M_{el}$  es superior a 1 se utilizará el módulo resistente elástico de la sección bruta para el cálculo, ya que nos encontramos en Clase 1, 2 o 3. Una vez pasado el límite de Clase 3 se deberá evaluar si calculará el módulo resistente elástico de la sección eficaz como es en la viga S4.



**Figura 5.4: Límite Clase 2 para elementos en compresión en las vigas simplemente apoyadas**

El límite de Clase 2 define si el análisis de la sección será plástico o elástico. Como se observa en la figura Tabla 5.18 cuando el ratio de  $M_u/M_{pl}$  es superior a 1 se realizará un análisis plástico de la sección y las secciones que se encuentren en el ratio inferior a 1 se realizará un análisis elástico.

La distinción entre Clase 1 y 2 de la sección transversal se determina por la capacidad de rotación que como se ha explicado con anterioridad, se obtiene a partir de la medida de rotación entre el punto donde la curva momento-curvatura alcanza la capacidad de

flexión plástica en la rama creciente y el punto donde el momento está por debajo de  $M_{pl}$  en la rama descendente.

Según la Tabla 4.11 se observa que la capacidad de rotación de la viga S1 es de 6,8, por lo que supera el valor de  $R > 3$  de manera que se clasifica como Clase 1.

A continuación en la Tabla 5.7 se presenta la comparación de clasificación de cada viga ensayada respecto con lo predicho por la norma europea EN 199-1-4:2006 [15] y el Manual de Diseño de Acero Inoxidable [2].

**Tabla 5.7: Comparación de clasificación de secciones según campaña experimental y normas**

	<b>Clase de sección según campaña experimental</b>	<b>Clase de sección según [15]</b>	<b>Clase de sección según [2]</b>
<b>S1</b>	Clase 1	Clase 1	Clase 1
<b>S2</b>	Clase 2	Clase 1	Clase 1
<b>S3</b>	Clase 2	Clase 1	Clase 1
<b>S4</b>	Clase 4	Clase 4	Clase 3

Como se puede observar en la Tabla 5.7 y como se ha comentado con anterioridad, en la campaña experimental no se llega a conocer la capacidad de rotación de la viga S2 y S3 por lo tanto se consideran clase 2, ya que el ratio de  $M_u/M_{pl}$  es superior a 1. En cambio la norma europea y el manual de diseño predicen que la clasificación de sección de la viga S2 y S3 es de Clase 1.

## 5.4 Capacidad de la sección transversal sometida a compresión

Se realiza la evaluación de las diferentes normas y métodos alternativos para el cálculo de la resistencia de una sección hueca rectangular transversal de acero inoxidable a compresión.

En el apartado 2.5 se exponen los diferentes métodos de cálculo según las normas internacionales EN1993-1-4:2006 [15], AS/NZS 4673:2001 [12] y los métodos alternativos Continuous Strength Method (CSM) y Direct Strength Method (DSM).

### 5.4.1 Evaluación de la resistencia a compresión en EN 1993-1-4:2006 [15]

En EN 1993-1-4:2006 [15] para determinar la capacidad última de resistencia a compresión de la sección transversal se determina en función de la clasificación de sección que se ha realizado en 5.2. Para determinar la capacidad resistente última de la sección sometida a compresión pura se realizará según las expresiones (5.1) para Clase 1, 2 y 3 y (5.2) para Clase 4.

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.1)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.2)$$

Donde:

- A es el área de la sección transversal
- $A_{eff}$  es el área eficaz de la sección transversal
- $f_y$  es el límite elástico
- $\gamma_{M0}$  es un coeficiente parcial de seguridad

Al tratarse de resultados experimentales se tendrá en cuenta el valor característico de los resultados obtenidos y no se utilizará el coeficiente de seguridad, por lo tanto el valor de  $\gamma_{M0}$  será de 1.

En la Tabla 5.8 se presentan los resultados de la capacidad resistente a compresión. Como se puede observar en la secciones SC-S3 y SC-S4 se aplica el factor de reducción para encontrar el área eficaz ya que son Clase 4.

En el espécimen SC-S3 solo los elementos que conforman la altura son Clase 4, mientras que los elementos que forman el ancho son Clase 1, pero como se ha comentado con anterioridad, la clasificación de la sección la define el elemento con Clase más desfavorable. Así se observa que solo se aplica el factor de reducción a la altura de la sección.

**Tabla 5.8: Resultado de la capacidad resistente a compresión según EN 1993-1-4:2006 [15]**

	$\lambda_H$	$\lambda_B$	$\rho_H$	$\rho_B$	A o $A_{eff}$	$N_{c,Rk}$ [kN]
SC - S1	--	--	--	--	2074,7	943,0
SC - S2	--	--	--	--	1301,8	494,5
SC - S3	0,73	--	0,91	--	1132,4	547,2
SC - S4	1,43	0,69	0,50	0,95	1135,7	391,1

El valor de  $\lambda_H$  y  $\lambda_B$  corresponden a la esbeltez y  $\rho_H$  y  $\rho_B$  al factor de reducción de la altura H y el ancho B de la sección transversal respectivamente.



#### 5.4.2 Evaluación de la resistencia a compresión en AS/NZS 4673:20016 [12]

La normativa australiana también requiere de una clasificación de sección análoga a lo realizado por EN 1993-1-4:2006 [15] pero con límites de esbeltez diferentes que se pueden consultar en 2.5.2.

Para el cálculo de la resistencia última a compresión de la sección transversal causada por una fuerza axial se obtiene según las expresiones (5.3) y (5.4).

$$\phi_c N_c \quad (5.3)$$

$$N_c = A_e f_n \quad (5.4)$$

Donde:

- $\phi_c$  es el coeficiente reductor de la capacidad de los elementos en compresión, con un valor de 0,85
- $N_c$  es la fuerza nominal del elemento en compresión
- $A_e$  es el área efectiva calculada en la tensión de abolladura  $f_n$
- $f_n$  se toma como valor el límite elástico de la sección  $f_y$

Al tratarse de resultados experimentales se tendrá en cuenta el valor característico de los resultados obtenidos y no se utilizará el factor de resistencia, por lo tanto  $\phi_c = 1$ .

Conforme con lo expuesto anteriormente se presentan los resultados de la evaluación de las secciones transversales a compresión en la Tabla 5.9. Se resaltan las esbelteces que superan el límite marcado por la norma y a las cuales se les aplicará el factor de reducción para encontrar el área eficaz.

**Tabla 5.9: Resultado de la capacidad resistente a compresión según AS/NZS 4673:2001 [12]**

	$\lambda_H$	$\lambda_B$	Límite	$\rho_H$	$\rho_B$	$A_e$	$N_c$ [kN]
SC - S1	0,50	0,36	<0,673	--	--	2074,7	943,0
SC - S2	0,58	0,46	<0,673	--	--	1301,8	494,5
SC - S3	<b>0,78</b>	0,26	>0,673	0,92	--	1141,0	551,4
SC - S4	<b>1,47</b>	<b>0,74</b>	>0,673	0,58	0,95	1228,4	423,1

El valor de  $\lambda_H$  y  $\lambda_B$  corresponden a la esbeltez y  $\rho_H$  y  $\rho_B$  al factor de reducción de la altura  $H$  y el ancho  $B$  de la sección transversal respectivamente.

Como se puede observar en la Tabla 5.9 la sección SC-S3 supera el límite de esbeltez únicamente en la altura del espécimen, por lo que sólo se aplica el factor de reducción al elemento alto de la sección transversal. Sin embargo en la sección SC-S4 se reduce tanto el alto como el ancho.

#### 5.4.3 Evaluación de la resistencia a compresión en Continuous Strength Method (CSM)

En el Continuous Strength Method (CSM) la resistencia de la sección transversal  $N_{csm}$  sometida a compresión para secciones robustas formadas por chapas con  $\lambda_p \leq 0,68$  correspondientes a  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1$  se determina según la ecuación (5.5).

Para secciones esbeltas formadas por chapas con  $\lambda_p > 0,68$  correspondiente a  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1$  la resistencia de la sección transversal sometida a compresión se determina según la ecuación (5.6).

Donde interviene el área bruta de la sección transversal y la tensión de cálculo  $f_{csm}$  que se define según la expresión (5.7) y el límite elástico  $f_y$ .

$$N_{csm} = \frac{f_{csm} A}{\gamma_{M0}} \quad (5.5)$$

$$N_{csm} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.6)$$

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \quad (5.7)$$

Donde  $E_{sh}$  se calculará según la expresión (5.8).

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16 \varepsilon_u - (\varepsilon_y + 0,002)} \quad (5.8)$$

Donde:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}.$$

$$\varepsilon_y = f_y / E$$

En la Tabla 5.10 se presentan los resultados de la capacidad resistente a compresión según el Continuous Strength Method. La esbeltez seccional  $\lambda_p$  se calcula en función de la tensión crítica de abolladura local menor de los elementos planos que forman la sección transversal, considerando  $k_\sigma = 4$ , ya que todos los elementos de la sección transversal están sometidos a compresión.

Como se puede observar la sección SC-S4 tiene una esbeltez seccional por encima del límite de este método, por lo que se considera una sección esbelta.

**Tabla 5.10: Resultado de la capacidad resistente a compresión según CSM**

	$\sigma_{cr,H}$ [MPa]	$\sigma_{cr,B}$ [MPa]	$\lambda_p$	Límite	$\varepsilon_{CSM}/\varepsilon_y$	$f_{csm}$ [MPa]	$N_{csm}$ [kN]
<b>SC - S1</b>	4305,7	11653,6	0,33	<0,68	14,3	606,6	1258,6
<b>SC - S2</b>	2446,1	4264,0	0,39	<0,68	7,7	439,1	571,7
<b>SC - S3</b>	1713,3	25489,4	0,52	<0,68	2,4	501,2	573,8
<b>SC - S4</b>	302,6	1333,1	1,10	>0,68	0,8	--	478,6

#### 5.4.4 Evaluación de la resistencia a compresión en Direct Strength Method (DSM)

Para el cálculo de la resistencia a compresión de la sección transversal se considera que  $R_{nl} = N_{nl}$  y  $R_y = N_y$ , donde  $N_y$  es el axil de plastificación y  $R_{crl}$  corresponde a la tensión crítica de abolladura local en compresión  $N_{crl}$ , las expresiones (5.9) y (5.10) recogen el método de cálculo. Para el cálculo de la capacidad resistente de la sección transversal a compresión pura se utilizará la ecuación de Arrayago et al. [23] ya que ésta se basa en secciones tubulares de acero inoxidable.

$$\frac{R_{enh\_nl}}{R_y} = \begin{cases} 1 + (1 - 1,29\lambda_l) \left( \frac{\sigma_u}{f_y} - 1 \right) & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left( \frac{0,95}{\lambda_l^{0,8}} - \frac{0,15}{\lambda_l^{1,6}} \right) & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{R_y}{R_{crl}}} \quad (5.10)$$

En la Tabla 5.11 se presentan los resultados obtenidos según el Direct Strength Method. Como se puede observar la sección SC-S4 tiene un una esbeltez superior al límite del método.

**Tabla 5.11: Resultado de la capacidad resistente a compresión según DSM**

	$R_{cr,H}$ [MPa]	$R_{cr,B}$ [MPa]	$\lambda_p$	Límite	$N_{enh\_nl}/N_y$	$N_{enh\_nl}$ [kN]
<b>SC - S1</b>	4305,7	11653,6	0,33	<0,776	1,40	1321,7
<b>SC - S2</b>	2446,1	4264,0	0,39	<0,776	1,44	713,0
<b>SC - S3</b>	1713,3	25489,4	0,53	<0,776	1,20	663,6
<b>SC - S4</b>	302,6	1333,1	1,10	>0,776	0,81	455,2

## 5.5 Comparación de los resultados experimentales y el análisis numérico de secciones sometidas a compresión

En este apartado se presenta la comparación de las diferentes normas y métodos presentados anteriormente para evaluar la precisión de cada uno y así determinar cuál de ellos se ajusta más a los resultados obtenidos de la campaña experimental expuestos en el apartado 4.3.

En la Tabla 5.12 se muestran los ratios para las expresiones codificadas de las normas y los métodos alternativos.

$N_{EN}$  hace referencia a las expresiones en EN1993-1-4:2006,  $N_{NZS}$  hace referencia a AS/NZS 4673:2001,  $N_{csm}$  al método alternativo Continuous Strength Method y  $N_{DSM}$  al método Direct Strength Method.

También se presenta el valor medio del ratio de las expresiones codificadas con los ensayos experimentales y el coeficiente de variación (CV), obtenido como el ratio entre la desviación media y el valor promedio.

**Tabla 5.12: Comparación de los ensayos experimentales a compresión con la capacidad resistente según las normas y métodos de cálculo alternativos**

	$N_u$ [kN]	$N_{EN}/N_u$	$N_{NZS}/N_u$	$N_{csm}/N_u$	$N_{DSM}/N_u$
<b>S1-SC</b>	1194,6	0,79	0,79	1,05	1,11
<b>S2-SC</b>	672,5	0,74	0,74	0,85	1,06
<b>S3-SC</b>	547,0	1,00	1,01	1,05	1,21

<b>S4-SC</b>	438,0	0,89	0,97	1,09	1,04
<b>MEDIA</b>	--	0,85	0,88	1,01	1,10
<b>CV</b>	--	0,14	0,15	0,11	0,07

Analizando la Tabla 5.12 la norma o método alternativo que tiene mejor predicción para la resistencia transversal a compresión de secciones rectangulares huecas de acero inoxidable es el Continuous Strength Method (CSM). Como se puede observar la normas EN 1993-1-4:2006 [15] y AS/NZS 4673:2001 [12] son mucho más conservadoras y del lado de la seguridad. Sin embargo los métodos alternativos de diseño se aproximan más al comportamiento real del acero inoxidable, de manera que entre el cálculo y los ensayos experimentales hay muy poca variación.

## 5.6 Capacidad de la sección transversal sometida a flexión

En esta sección se presenta un estudio similar al del apartado 5.4 pero en relación a la capacidad de las secciones transversales sometidas a flexión.

Se evalúan las diferentes expresiones recogidas en las normas EN 1993-1-4:2006 [15] y AS/NZS 4673:2001 [12] y los métodos alternativos de Continuous Strength Method (CSM) y Direct Strength Method (DSM) en relación con las cargas últimas obtenidas en los ensayos antes descritos.

### 5.6.1 Evaluación de la resistencia a flexión en EN 1993-1-4:2006 [15]

El cálculo de la capacidad resistente a flexión de una sección transversal depende de la clasificación de la sección transversal. Para secciones clasificadas como Clase 1 o 2 se calcula a partir de la capacidad plástica según (5.11), para secciones Clase 3 se calcula según la capacidad elástica como se muestra en la expresión (5.12) y para secciones Clase 4 se tiene que considerar las propiedades efectivas de la sección según la expresión (5.13).

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.11)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.12)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.13)$$

Al tratarse de resultados experimentales se tendrá en cuenta el valor característico de los resultados obtenidos y no se utilizará el coeficiente de seguridad, por lo tanto el valor de  $\gamma_{M0}$  será igual a 1.

En la Tabla 5.13 se muestran los resultados de la capacidad de la sección transversal a flexión. Como se ha comentado con anterioridad la viga S4 es Clase 4 a causa del ancho sometido a compresión, por lo que solamente se aplicará el factor de reducción en el elemento que forma la base y se busca el módulo resistente elástico de la sección eficaz  $W_{eff}$ .

**Tabla 5.13: Resultado de la capacidad resistente a flexión según EN 1993-1-4:2006 [15]**

	$\lambda_H$	$\lambda_B$	$\rho_H$	$\rho_B$	$W_{pl}$ [mm <sup>3</sup> ]	$W_{eff}$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_{c,Rk}$ [kNm]
<b>S1</b>	--	--	--	--	93600	--	42,5
<b>S2</b>	--	--	--	--	49120	--	18,7
<b>S3</b>	--	--	--	--	45440	--	22,0
<b>S4</b>	--	0,69	--	0,95	--	91810	31,6

El valor de  $\lambda_H$  y  $\lambda_B$  corresponden a la esbeltez y  $\rho_H$  y  $\rho_B$  al factor de reducción de la altura H y el ancho B de la sección transversal respectivamente.

### 5.6.2 Evaluación de la resistencia a flexión en AS/NZS 4673:2006 [12]

Para el cálculo de la resistencia última a flexión, se determina según la ecuación (5.14) utilizando  $\phi_b = 0,9$  y la capacidad nominal a flexión  $M_s$  irá en función de la esbeltez de su elemento. Las expresiones (5.15) y (5.16) exponen la manera de encontrar  $M_s$  para secciones compactas.

$$\phi_b M_s \quad (5.14)$$

$$si \quad b/t = \lambda_1$$

$$\lambda_1 = \frac{1,11}{\sqrt{f_{ye}/E_o}} \quad (5.15)$$

$$M_s = f_y S_p \quad (5.16)$$

Donde:

$b$  es el ancho plano del alma en compresión  
 $S_p$  es el módulo plástico de la sección

Para secciones no compactas donde si  $b/t > \lambda_1$  el momento flector de cálculo se puede encontrar dependiendo de la esbeltez del elemento, para el cálculo de secciones análogas Clase 4 la resistencia a flexión  $M_s$  se expresa según la expresión (5.17) y para secciones equivalentes a Clase 3 la capacidad de flexión  $M_b$  se expresa según la expresión (5.18)

$$M_s = Z_e f_y \quad (5.17)$$

$$M_b = Z_c \left( \frac{M_c}{Z_f} \right) \quad (5.18)$$

Donde:

$Z_e$  es el modulo efectivo de la sección calculado en el extremo de compresión o en la fibra en tensión  
 $f_y$  es el límite elástico del acero  
 $Z_c$  es el módulo elástico de la sección efectiva calculada en la fibra con mayor tensión de compresión  
 $Z_f$  es el módulo elástico de todo el conjunto sin reducir la sección en la fibra con máxima compresión

Al tratarse de resultados experimentales se tendrá en cuenta el valor característico de los resultados obtenidos y no se utilizará el factor de resistencia, por lo tanto  $\phi_b = 1$

En la Tabla 5.14 se muestran los resultados parciales de la capacidad transversal a flexión. Como se puede apreciar la sección S4 es la más esbelta y se resalta el valor que supera el límite de esbeltez, por lo que se aplica el factor de reducción  $\rho_B$  al ancho de la sección únicamente.

**Tabla 5.14: Resultado de la capacidad resistente a flexión según NS/NZE 4673:2001 [12]**

	$\lambda_H$	$\lambda_B$	Límite	$\rho_H$	$\rho_B$	$W_{eff}$ [mm <sup>3</sup> ]	$M_s$ [kNm]
<b>S1</b>	0,21	0,34	<0,673	--	--	--	49,8
<b>S2</b>	0,24	0,49	<0,673	--	--	--	23,8
<b>S3</b>	0,32	0,26	>0,673	--	--	--	25,0
<b>S4</b>	0,60	<b>0,74</b>	>0,673	--	0,95	91810	31,6

El valor de  $\lambda_H$  y  $\lambda_B$  corresponden a la esbeltez y  $\rho_H$  y  $\rho_B$  al factor de reducción de la altura H y el ancho B de la sección transversal respectivamente.

### 5.6.3 Evaluación de la resistencia a flexión en Continuous Strength Method (CSM)

La resistencia a flexión para secciones doblemente simétricas se obtiene dependiendo del valor de la capacidad de deformación de las secciones transversales  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$  como está expuesto en 2.5.3.

Para aquellas secciones con  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1$  la resistencia seccional a flexión puede determinarse a partir de (5.19) y para secciones con  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1$  la resistencia seccional se determina a partir de (5.20).

$$M_{csm} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left( \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \right)^2 \right] \quad (5.19)$$

$$M_{csm} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.20)$$

Donde  $E_{sh}$  corresponde al módulo de endurecimiento que se obtiene según la expresión (5.21), E el módulo de elasticidad,  $W_{el}$  módulo elástico de la sección,  $W_{pl}$  módulo plástico de la sección.

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - (\varepsilon_y + 0,002)} \quad (5.21)$$

Donde:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$$

$$\varepsilon_y = f_y/E$$

Como se ha explicado con anterioridad se tomará el valor del coeficiente de seguridad  $\gamma_{M0} = 1$ .

En la Tabla 5.15 se muestran los resultados parciales de la capacidad resistente a flexión según el Continuous Strength Method. La esbeltez seccional  $\lambda_p$  se calcula en función de la tensión crítica de abolladura local menor de los elementos planos que forman la sección transversal, considerando  $k_\sigma = 4$  para los elementos que forman el ancho B, de la sección al estar sometidos a compresión y  $k_\sigma = 23,9$  para los elementos que forman la altura H sometidos a flexión.



**Tabla 5.15: Resultado de la capacidad resistente a flexión según CSM**

	$\sigma_{cr,H}$ [MPa]	$\sigma_{cr,B}$ [MPa]	$\lambda_p$	Límite	$\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$	$M_{csm}$ [kNm]
<b>S1</b>	25726,5	11653,6	0,20	<0,68	15,00	54,2
<b>S2</b>	15212,8	4264,0	0,30	<0,68	15,00	23,6
<b>S3</b>	10236,8	25489,4	0,22	<0,68	15,00	27,8
<b>S4</b>	1808,0	1333,1	0,51	<0,68	2,86	40,8

Como se puede observar en la Tabla 5.15 la relación  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$  para las vigas S1, S2 y S3 es el mínimo según lo expuesto en la ecuación (2.8). En la viga S4, a diferencia de las otras tres secciones, es más limitante la tensión crítica de abolladura  $\sigma_{cr}$  del ancho sometido a compresión que de la altura sometida a flexión, por lo que la relación  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$  tiene un valor mucho menor.

#### 5.6.4 Evaluación de la resistencia a flexión en Direct Strength Method (DSM)

Para el cálculo de la resistencia a flexión de la sección transversal se considera que  $R_{nl} = M_{nl}$  y  $R_y = M_y$ , donde  $M_y$  el momento elástico.  $R_{crl}$  corresponde a la tensión crítica de abolladura local  $M_{crl}$ .

Análogamente a lo citado en la evaluación de la resistencia a compresión en Direct Strength Method la expresión utilizada para el cálculo es la correspondiente a Arrayago et al. [23] que se muestra en la ecuación (5.22) y la expresión (5.23) para obtener el valor de  $\lambda_l$ .

$$\frac{R_{enh\_nl}}{R_y} = \begin{cases} 1 + (1 - 1,29\lambda_l) \left( \frac{\sigma_u}{f_y} - 1 \right) & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ \left( \frac{0,95}{\lambda_l^{0,8}} - \frac{0,15}{\lambda_l^{1,6}} \right) & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{cases} \quad (5.22)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{R_y}{R_{crl}}} \quad (5.23)$$

Las secciones robustas huecas rectangulares tienen un significativo comportamiento inelástico cuando el momento flector último alcanza la capacidad plástica de la sección  $M_{pl}$ , este fenómeno está incorporado en las normas de diseño.

En EN 1993-1-4:2006 [15] se asigna un análisis plástico para aquellas secciones clasificadas como Clase 1 o 2 mientras que AS/NZS 4673:2001 [12] tienen en cuenta el comportamiento inelástico asumiendo una curva ideal elástico-plástico tensión-deformación descrita en “Procedure II” de la norma.

De la misma manera en el DSM se implementa este comportamiento inelástico por Shifferaw y Schafer [23] enfocado para vigas en C y Z de acero al carbono. Esta nueva formulación quiere representar una función de la tensión máxima comprimida como se muestra en la ecuación (5.24) que contiene un factor  $C_y$  que se muestra en la ecuación (5.25), el cual es diferente a lo expuesto en “Procedure II” de AS/NZS 4673:2001 [12].  $\lambda_{ly}$  es el límite esbeltez para secciones de acero al carbono igual a 0,776.

$$M_{nl} = M_y + (M_{pl} - M_y) \left( 1 - \frac{1}{C_y^2} \right) \quad (5.24)$$

$$C_y = \left( \frac{\lambda_{ly}}{\lambda_l} \right)^{0,5} \quad (5.25)$$

A continuación en la Tabla 5.16 se presenta el resultado de la capacidad resistente a flexión, teniendo en cuenta que la altura de la sección transversal está flexionada y el ancho comprimido.

Se considera  $k_\sigma = 4$  para los elementos que forman el ancho B y  $k_\sigma = 23,9$  para los elementos que forman la altura H.

**Tabla 5.16: Resultado de la capacidad resistente a flexión según DSM**

	$R_{cr,H}$ [MPa]	$R_{cr,B}$ [MPa]	$\lambda_p$	Límite	$M_{nl}/M_y$	$M_{nl}$ [kNm]
<b>S1</b>	25726,5	11653,6	0,20	<0,776	1,52	50,3
<b>S2</b>	15212,8	4264,0	0,30	<0,776	1,54	23,4
<b>S3</b>	10236,8	25489,4	0,22	<0,776	1,46	23,6
<b>S4</b>	1808,0	1333,1	0,51	<0,776	1,34	43,8

En la Tabla 5.17 se presenta el cálculo teniendo en cuenta el comportamiento inelástico para las secciones robustas según la implementación de Shifferaw y Schafer [23] utilizando el factor  $C_y$ , por lo tanto la viga S4 al ser análoga a Clase 4 no se realiza equivalente al “Procedure II” de AS/NZE 4673:2001 [12].

**Tabla 5.17: Resultado de la capacidad resistente a flexión considerando el comportamiento inelástico según DSM**

	$R_{cr,H}$ [MPa]	$R_{cr,B}$ [MPa]	$\lambda_p$	$C_y$	$M_{nl}$ [kNm]
<b>S1</b>	25726,5	11653,6	0,20	1,98	40,2
<b>S2</b>	15212,8	4264,0	0,30	1,61	17,3
<b>S3</b>	10236,8	25489,4	0,22	1,89	20,4

## 5.7 Comparación de los resultados experimentales y el análisis numérico de secciones sometidas a flexión

A continuación en la Tabla 5.18 se muestran los ratios para las expresiones codificadas de las normas y los métodos alternativos.  $M_{EN}$  hace referencia a las expresiones en EN1993-1-4:2006 [15],  $M_{NZS}$  hace referencia a AS/NZS 4673:2001 [12],  $M_{csm}$  al método alternativo Continuous Strength Method,  $M_{DSM}$  al método Direct Strength Method según la ecuación (5.25), así como también teniendo en cuenta el comportamiento inelástico según la ecuación (5.26).

Además se presenta el valor medio del ratio de las expresiones codificadas con los ensayos experimentales y el coeficiente de variación (CV).

**Tabla 5.18: Comparación de los ensayos experimentales a flexión con la capacidad resistente según las normas y métodos de cálculo alternativos**

	$M_u$ [kNm]	$M_{EN}/M_u$	$M_{NZS}/M_u$	$M_{csm}/M_u$	$M_{DSM}/M_u$	$M_{DSM}/M_u$ PROC. II $C_y$
<b>S1</b>	59,3	0,72	0,72	0,91	0,85	0,68
<b>S2</b>	23,6	0,79	0,79	1,00	0,99	0,73
<b>S3</b>	26,9	0,82	0,82	1,03	0,88	0,76
<b>S4</b>	26,9	1,18	1,18	1,52	1,63	--
<b>MEDIA</b>	--	0,88	0,88	1,12	0,91	0,72
<b>CV</b>	--	0,23	0,24	0,24	0,41	0,06

Como se puede apreciar en la Tabla 5.18 la norma o método alternativo con mejor predicción para secciones huecas rectangulares de acero inoxidable sometidas a flexión es la el método Continuous Strength Method, con una predicción muy cercana a los resultados de la campaña experimental. Cabe también comentar que el método Direct Strength Method está también muy cerca de los resultados experimentales.

Las normas internacionales EN 1993-1-4:2006 [15] y AS/NZS 4673:2001 [12], de la misma manera que en el cálculo de la resistencia a compresión, son muy conservadoras y del lado de la seguridad obteniendo resistencias de aproximadamente un 20% inferiores a las obtenidas por ensayos.

Sobre la viga S4, obtuvimos una carga mucho menor a la predicha, de esta manera los métodos alternativos de diseño tienen un ratio tan elevado. Esto es debido a que tenía mucha más imperfección local a partir de los procesos de corte del elemento en taller.

## 6 CONCLUSIONES

En este apartado se expondrán las valoraciones extraídas de la campaña experimental y de la comparación con el análisis numérico realizado a partir de las normas y métodos alternativos basado en el acero inoxidable. También se incluyen futuras líneas de investigación para continuar analizando el comportamiento del acero inoxidable como material estructural. Primeramente se presentaran conclusiones generales sobre el estudio y en la siguiente sección se presentaran conclusiones más específicas basadas en los capítulos anteriores.

Con la realización de la campaña experimental se ha podido estudiar el comportamiento de secciones huecas rectangulares de acero inoxidable austenítico grado 1.4301. Se realizaron cuatro ensayos de stub columns sometidos a compresión y cuatro vigas sometidas a flexión. Previamente a la realización de la campaña experimental se realizó la medición de las imperfecciones locales detenidamente con el fin de poder predecir mediante modelos numéricos hasta qué valores se podían llegar en los ensayos.

Un vez acabada la campaña experimental se ha pasado al análisis de los resultados obtenidos en el laboratorio con las normas y manuales alternativos de diseño que actualmente están en desarrollo enfocados únicamente en acero inoxidable.

De esta manera se considera que el objetivo general del estudio ha sido exitosamente llevado a cabo y con la oportunidad de poder realizar in situ ensayos en el laboratorio de Tecnologia d'Estructures Lluís Agulló de la Universidad Politècnica de Catalunya.

Haciendo referencia a los ensayos llevados a cabo en el Laboratorio, cabe comentar de la importancia de las decisiones que se toman “in situ” en el momento de ensayar y de las cuales después se reflejan en el análisis de los resultados finales.

Con la realización de la campaña experimental y el análisis de resultados final el objetivo principal sobre entender el comportamiento y la capacidad resistente de secciones huecas rectangulares de acero inoxidable se ha podido llevar a cabo.

A partir del análisis de los resultados se extraen las conclusiones específicas.

### 6.1 Conclusiones específicas

Según los resultados obtenidos en el capítulo 5, se extraen las valoraciones específicas tanto de la campaña experimental como de las normas y métodos de diseño alternativos.

Previamente al cálculo de la capacidad de la sección transversal la norma europea EN 1993-1-4:2006 [15] y el Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2] requieren una clasificación a nivel seccional en función del esfuerzo al cual esté sometido cada elemento que conforma la sección transversal. La clasificación se calcula en función de

las dimensiones planas del elemento estudiado. Se observa que el Manual de Diseño para Acero Inoxidable [2] utiliza valores menos conservadores para el cálculo de la dimensión plana del elemento, por lo que los resultados de la clasificación son más limitantes que en EN 1993-1-4:2006 [15].

Las normas EN 1993-1-4:2006 [15] y AS/NZS 4673:2001 [12] son considerablemente más conservadoras respecto al comportamiento real del acero inoxidable, sobre todo, porque no tienen en cuenta su endurecimiento por deformación. Al estar basadas en las normas para el diseño de acero al carbono los límites de esbeltez y el cálculo del comportamiento de la sección transversal sometida a compresión y a flexión quedan del lado de la seguridad permitiendo una variación entre lo predicho por la norma y los resultados de la campaña experimental de un 20%.

Por lo contrario los métodos de diseño alternativos Continuous Strength Method (CSM) y Direct Strength Method (DSM) al tener en cuenta el endurecimiento por deformación del acero inoxidable son menos conservadoras y se acercan más a los resultados reales de la campaña experimental.

Para el caso de secciones esbeltas la diferencia es muy significativa entre las normas internacionales y los métodos de diseño alternativos. Las normas internacionales se basan en el método del ancho eficaz, aplicando un factor de reducción al elemento que sea Clase 4 en EN 199-1-4:2006 [15] o superando el límite de clasificación análogo a Clase 4 en AS/NZS 4673:2001 [12], por el contrario los métodos alternativos CSM y DSM se basan en las propiedades de la sección bruta de manera que el cálculo es más sencillo.

Cabe mencionar que las propiedades del material no son las reales para las secciones ensayadas, ya que es ideal realizar los ensayos de las probetas de la zona plana y esquina antes de los ensayos a nivel de sección. Pero al no haberse podido realizar antes se han utilizado unas propiedades de material de un estudio análogo al presentado en este documento con el mismo grado de acero inoxidable.

Sobre la viga S4 sometida a flexión, los ratios del Continuous Strength Method y Direct Strength Method son inseguros debido a que el espécimen tenía muchas más imperfección de los esperado a causa de su esbeltez, producidos en los procesos de corte y doblado de los elementos en taller. Además esto produce que la solución para evitar el “web crippling” colocando maderas en el interior de la sección no haya funcionado correctamente por lo que el elemento fallo por la interacción entre el momento flector y la carga local aplicada.

Esto no ocurre con los otros especímenes, ya que al ser menos esbeltos la colocación de la madera ha funcionado correctamente, por lo que el “web crippling” se ha podido evitar haciendo que el fallo de la viga se produzca por flexión únicamente.

## 6.2 Futuras líneas de investigación

Las recomendaciones e ideas surgidas a partir de la realización de este estudio se presentan en esta última sección. Primeramente se presentaran recomendaciones a nivel de campaña experimentales y finalmente sobre las normas y métodos alternativos de diseño.

Una cantidad considerable de campañas experimentales se han llevado a cabo en los últimos años en secciones huecas rectangulares de acero inoxidable y se ha investigado sobre su comportamiento seccional en diferentes grados. Además se ha hecho énfasis en considerar el endurecimiento por deformación y la abolladura local de los especímenes. Dado que el comportamiento a nivel seccional ha sido muy estudiado, la investigación debería realizarse con configuraciones estructurales más complejas, como son los pórticos de acero inoxidable.

La investigación se debería centrar en las condiciones a las cuales estaría expuesto, como es ambiente o temperatura. Considerar cargas permanentes en la estructura a lo largo del tiempo e investigar la interacción entre el diferente comportamiento de las secciones sometidas a diferentes esfuerzos.

La investigación de pórticos de acero inoxidable permitirán ajustar los valores de diseño y la metodología de cálculo de las normas internacionales y de los manuales de diseño, para que cada vez estén más cerca del comportamiento real.

El estudio debería extenderse en futuros años a situaciones sometidas a fuego o a terremotos, para poder evaluar el comportamiento y la resistencia de pórticos de acero inoxidable sometidos a altas temperaturas o evaluar su ductilidad sometido a ciclos como los que se pueden provocar en un terremoto.

## 7 REFERENCIAS

- [1] The Specialty Steel Industry of North America (SSINA). *Stainless steel overview: alloy classifications*. recuperado de <http://www.ssina.com/overview/alloy-families.html> (7 abril 2018).
- [2] Euro Inox. Manual de Diseño para Acero Inoxidable Estructural. Cuarta Edición 2007.
- [3] Ramberg W, Osgood WR. Description of stress-strain curves by three parameters. Technical Note No 902 1943, Washington, D.C, USA: National Advisory Committee for Aeronautics.
- [4] Hill HH. Determination of stress-strain relations from “offset” yield strength value. Technical Note 1944;927.
- [5] Mirambell E, Real E. On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation. *Journal of Constructional Steel Research* 2000;54(4):109-133.
- [6] Index Mundi. *Nickel Monthly Price*. Recuperado de <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=nickel&months=120> (8 abril 2018).
- [7] European Committee for Standardization. EN10088-4. Stainless steels. Part 4: Technical delivery conditions for sheet7plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes 2009 (Brussels, Belgium).
- [8] International Molybdenum Association. *Austenitic stainless steel*. Recuperado de <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/austenitic-stainless-steel.php> (8 abril 2018).
- [9] Southern Africa Stainless Steel Development Association (SASSDA). *Stainless Steel and the Enviroment*. Recuperado de <https://sassda.co.za/about-stainless/stainless-steel-and-the-environment/> (1 mayo 2018).
- [10] American Iron and Steel Institute. Specifications for the design of cold-formed stainless steel structural members 1974 (Washington, D.C.).



- [11] American Society of Civil Engineers. Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members 2002 (Reston, US).
- [12] Sidney: Standards Australia. AS/NZS 4673: Cold-formed stainless steel structures 2001 (Australia).
- [13] Euro Inox. Design Manual for Stainless Steel. Second Edition 1994.
- [14] European Convention for Constructional Steelwork. EN 1993-1-1: Background documentations and design guidelines.
- [15] European Committee for Standardization. EN 1993-1-4. European Committee for Standardization Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4: General rules 2006 (Brussels, Belgium).
- [16] Afshan S, Gardner L. The continuous strength method for structural stainless steel design. *Thin-Walled Structures* 2013;68:42-49.
- [17] Bock M, Gardner L, Real E. Material and local buckling response of cold-formed ferritic stainless steel sections. *Thin-Walled Structures* 2015;89:131-141.
- [18] Schafer B, Pekoz T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. *Thin-Walled Structures, Research and Developments* 1998:127-44.
- [19] Rasmussen KJR, Burns T, Bezkorovainy P, Bambach MR. Numerical modelling of stainless steel plates in compressions. *Journal of Constructional Steel Research* 2003;59:1345-1362.
- [20] Becque J, Lecce M, Rasmussen KJR. The direct strength method for stainless steel compression members. *Journal of Constructional Steel Research* 2008;64:1231-1238.
- [21] Sidney Standards Australia. AS/NZS 4600. Cold-formed steel structures 2006 (Australia).
- [22] Rossi B, Rasmussen KJR. Carryinh capacity of stainless steel columns in the low slenderness range. *Journal of Constructional Steel Research* 2013;139:1088-1092.

- [23] Arrayago I, Rasmussen KJR, Real E. Full slenderness DSM approach for stainless steel hollow cross-section columns and beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2017;138:246-263.
- [24] Shifferaw Y, Shafer BW. Inelastic bending capacity of cold-formed steel members. *Journal of Constructional Steel Research* 2012;138(4):468-480.
- [25] European Committee for Standardization. EN 1993-1-3. European Committee for Standardizations Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1.3; General rules. Supplementary rules for stainless steels. 2006 (Brussels, Belgium).
- [26] Rasmussen KJR, Hancock GJ. Design of cold-formed stainless steel tubular members. I: Columns. *Journal of Constructional Steel Research* 1993;119(8):2349-2367.
- [27] Rasmussen KJR Hancock GJ. Design of cold-formed stainless steel tubular members. II: Beams. *Journal of Constructional Steel Research* 1993;119(8):2368-2386.
- [28] Talja A, Salmi P. Design of stainless steel RHS beams, columns and beam-columns. VTT Technical Research Centre of Finland 1995;1619.
- [29] Kuwamura H. Local buckling of thin-walled stainless steel members. *Steel Structures* 2003;3(3):191-201.
- [30] Liu Y, Young B. Buckling of stainless steel square hollow section compression members. *Journal of Constructional Steel Research* 2003;59(2):165-177.
- [31] Young B, Liu Y. Experimental investigation of cold-formed stainless steel columns. *Journal of Structural Engineering* 2003;129(2):169-176.
- [32] Gardner L, Nethercot DA. Experiment on stainless steel hollow sections – Part 1. Material and cross-sectional behaviour. *Journal of Constructional Steel Research* 2004;60(9):1291-1318.
- [33] Gardner L, Nethercot DA. Experiment on stainless steel hollow sections – Part 2. Member behaviour of columns and beams. *Journal of Constructional Steel Research* 2004;60(9):1319-1332.
- [34] Young B, Lui WM. Behaviour of cold-formed high strength stainless steel sections. *Journal of Structural Engineering* 2005;131(11):1738-1745.

- [35] Zhao O, Rossi B, Gardner L, Young B. Behaviour of structural stainless steel cross-sections under combined loading – Part I: Experimental study. *Engineering Structures* 2015;89:236-246.
- [36] Zhou F, Young B. Test of cold-formed stainless steel tubular flexural members. *Thin-Walled Structures* 2005;43(9):1325-1337.
- [37] Real E, Mirambell E. Flexural behaviour of stainless steel beams. *Engineering Structures* 2005;28(6):926-934.
- [38] Gardner L, Talja A, Baddoo NR. Structural design of high-strength austenitic stainless steel. *Thin-Walled Structures* 2006;44(5):517-528.
- [39] Theofanous M, Saliba N, Zhao O, Gardner L. Ultimate response of stainless steel continuous beams. *Thin-Walled Structures* 2014;83:115-127.
- [40] Singh T, Singh K. Structural performance of YSt-310 cold-formed tubular steel stub columns. *Thin-Walled Structures* 2017;121:25-40.
- [41] Fang C, Zhou F, Luo C. Cold-formed stainless steel RHSs/SHSs under combined compression and cyclic bending. *Journal of Constructional Steel Research* 2018;141:9-22.
- [42] Ckantou M, Kokosis G, Theofanous M, Dirar S. Plastic design of stainless steel continuous beams. *Journal of Constructional Steel Research* 2018;Article in press.
- [43] Zhao O, Gardner L, Young B. Behaviour and design of stainless steel SHS and RHS beam-columns. *Journal of Constructional Steel Research* 2016;106:330-345.
- [44] Bock M, Arrayago I, Real E. Experiments on cold-formed ferritic stainless steel slender sections. *Journal of Constructional Steel Research* 2015;190:13-23.